UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL

Variación del carbono orgánico y productividad del suelo agrícola y de pastizales altoandinos en la localidad de Canrao, Huanta - Ayacucho

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN GESTIÓN AMBIENTAL

Código UNESCO	**:**	**2511.06 "Conservación de suelo"**
Línea de investigación UNAH	**:**	**Ciencias del medio ambiente**

TESISTA:

Bach. Medina Quispe, Paolo Rivaldo

ASESOR:

Ph.D. Castro Aponte, Walter Victor

HUANTA – PERÚ

2024

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO
Borrador de tesis Paolo Medina Quispe.docx

AUTOR
Paolo Rivaldo Medina Quispe

RECUENTO DE PALABRAS
20111 Words

RECUENTO DE CARACTERES
113234 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS
92 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO
4.7MB

FECHA DE ENTREGA
Jul 29, 2024 10:46 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME
Jul 29, 2024 10:48 AM GMT-5

8% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 7% Base de datos de Internet
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de Crossref
- Base de datos de contenido publicado de Crossref
- 5% Base de datos de trabajos entregados

Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 9 palabras)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
FIRMA DIGITAL

Firmado digitalmente por CASTRO APONTE Walter Victor FAU 20574653798 soft
Fecha: 2024.07.31 11:50:50 -06'00'

“Variación del carbono orgánico y productividad del suelo agrícola y de pastizales altoandinos en la localidad de Canrao, Huanta – Ayacucho”

AUTOR:

Bach. Medina Quispe, Paolo Rivaldo

ASESOR:

Ph.D. Castro Aponte, Walter Victor

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Creada por Ley N° 29658

FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL

"AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN Y AYACUCHO"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN GESTIÓN AMBIENTAL

En Huanta, en el auditorio de cinco esquinas Estudios Generales de la Universidad Nacional Autónoma de Huanta, a los 23 días del mes de julio de 2024, siendo las 04:00 horas, se dio inicio al acto académico de sustentación de tesis con la presencia de los docentes:

Dr. Santos Clemente Herrera Diaz	**Presidente**
Dr. Tulio Celestino Paytan Montañez	**Primer miembro**
Dr. Oseas Aristides Obregon Villantoy	**Segundo miembro**

Se procedió a dar lectura a la Resolución de Vicepresidencia Académica N° 065-2024-CO-UNAH, en la que señala fecha, hora y designación de jurado evaluador para la sustentación de tesis del Bachiller **Paolo Rivaldo Medina Quispe**, con la tesis titulada **"Variación del carbono orgánico y productividad del suelo agrícola y pastizales altoandinos en la localidad de Canrao, Huanta - Ayacucho"**; asesorado por el Ph. D. Walter Victor Castro Aponte, para optar el Título profesional de: Ingeniero en Gestión Ambiental.

Observaciones:

.....
.....
.....

Terminada la sustentación se procedió a la formulación de preguntas por los miembros del jurado evaluador, las mismas que fueron defendidas y absueltas por el tesista. Acto seguido se procedió a calificar con el resultado siguiente:

Cum laude	( )
Bueno	( )
Aprobado	(X)
No aprueba	( )

Con la calificación de ..Catorce..... (14)
Siendo las .5:15 p.m.. se da por finalizada el acto académico de sustentación de tesis pasando a firmar los miembros del jurado evaluador.

.....
Dr. Santos Clemente Herrera Diaz
PRESIDENTE

.....
Dr. Tulio Celestino Paytan Montañez
PRIMER MIEMBRO

.....
Dr. Oseas Aristides Obregon Villantoy
SEGUNDO MIEMBRO

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación dedico a mis seres queridos: Albino Medina Hurtado y Virginia Juana Quispe Aguilar, por su motivación y apoyo constante que permitieron hacer realidad mi objetivo. Asimismo, a mis hermanos y familiares que siempre estuvieron presentes con su apoyo emocional. Finalmente, a mi persona por el esfuerzo y dedicación continuo.

AGRADECIMIENTO

Al culminar la etapa de pregrado nos enorgullece rotundamente. Por ello, quiero expresar mi gratitud a las personas e instituciones que contribuyeron realizar este presente trabajo de investigación, sin la ayuda de ellos sería muy difícil.

Agradezco a mis padres por el apoyo en el presente trabajo.

Al Dr. Marcelo Daniel Nosetto por la orientación y el conocimiento científico prestado para concretizar el presente trabajo de investigación y para mi crecimiento académico y profesional.

A la Universidad Nacional Autónoma de Huanta por proporcionarme los recursos necesarios y el ambiente propicio para llevar a cabo esta investigación.

Finalmente, agradezco al asesor por su orientación, sus comentarios y sus consejos que fueron fundamental para seguir en adelante con el presente trabajo.

Índice de contenido

I INTRODUCCIÓN 16
II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 18
2.1 Descripción del problema 18
2.2 Formulación del problema 21
2.2.1 Problema general 21
2.2.2 Problemas específicos 21
2.3 Objetivos 21
2.3.1 Objetivo general 21
2.3.2 Objetivos específicos 21
2.4 Justificación e importancia 22
2.5 Hipótesis 23
2.5.1 Hipótesis general 23
2.5.2 Hipótesis específicas 24
2.6 Variable 24
III MARCO TEÓRICO 26
3.1 Antecedentes 26
3.1.1 Antecedentes investigativos a nivel internacional 26
3.1.2 Antecedentes investigativos a nivel nacional 34
3.1.3 Antecedentes investigativos a nivel regional 38
3.2 Bases teóricas 39
3.2.1 Servicios ecosistémicos 39
3.2.2 Ecosistemas altoandinos 40
3.2.3 Expansión agrícola y cambio de uso del suelo 40

3.2.4 Biomasa vegetal y las propiedades del suelo 41
3.2.5 Productividad y pérdida de nutrientes 41
3.2.6 Erosión del suelo 42
3.2.7 Carbono orgánico y servicios ecosistémicos en suelos agrícolas 43
3.2.8 Cambio de cobertura vegetal 43
3.2.9 Productividad primaria aérea 44
3.3 Definición de términos 44
3.3.1 Precipitación 44
3.3.2 Densidad aparente 44
3.3.3 Materia orgánica 44
3.3.4 Carbono orgánico 45
3.3.5 Sobrepastoreo 45
3.3.6 Pastizal 45
3.3.7 Agricultura 45
3.3.8 Georreferenciación 46
3.3.9 Imagen satelital 46
3.3.10 Landsat 46
3.3.11 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) 46
IV METODOLOGÍA 47
4.1 Tipo y nivel de investigación 47
4.2 Ámbito temporal y espacial 47
4.3 Población y muestra 50
4.4 Instrumentos 51
4.5 Procedimientos 51
4.6 Análisis de datos 55

V RESULTADOS Y DISCUSIÓN 58
5.1 RESULTADOS 58
5.1.1 Determinación de cambios del carbono orgánico en suelo agrícola y pastizal en función a las propiedades edáficas del suelo 58
5.1.2 Determinación de cambio en la productividad primaria de biomasa vegetal en suelo agrícola y pastizal en términos índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). 63
5.1.3 Estrategias para el manejo adecuado de ecosistemas altoandinos en la microcuenca del arroyo Sullccapallcca. 67
5.2 DISCUSIÓN 70
VI CONCLUSIONES 73
VII RECOMENDACIONES 75
VIII REFERENCIAS 76
IX ANEXOS 86

Índice de tablas

Tabla 1. *Definición de variable*..... 25

Tabla 2. *Materiales y equipos*..... 51

Tabla 3. *Análisis estadístico de T student* ……. 60

Tabla 4. *Datos del área de estudio* 91

Tabla 5. *Datos de NDVI mensual y anual*..... 92

Tabla 6. *Resumen del análisis estadístico*..... 93

Tabla 7. *Puntos georreferenciados de muestreo de suelo* ……. 95

Índice de figuras

Figura 1: *Localización del área de estudio y puntos determinados para el muestreo de suelo*.. 49

Figura 2: *Metodología para la evaluación de productividad y carbono orgánico del suelo*..... 57

Figura 3: *Barras de error estándar de (COS, Da y Stock C)* 59

Figura 4: *Variación de la reserva de COS* 62

Figura 5: *Valores medios y error estándar* ……64

Figura 6: *Correlación de variables ambientales con stock C* 66

Figura 7: *Área de estudio de la microcuenca Sullccapallcca* 86

Figura 8: *Zona de estudio con presencia de pastizal*..... 86

Figura 9: *Zona de estudio con presencia agrícola* 87

Figura 10: *Recolección de submuestras de suelo para Da*..... 87

Figura 11: *Recolección de submuestras de suelo para COS* 88

Figura 12: *Muestras de suelo para su posterior secado en una estufa* 88

Figura 13: *Muestras de suelo tamizado*..... 89

Figura 14: *Registro de peso para su calcinación* 89

Figura 15: *Calcinación de muestras de suelo en una mufla*..... 90

Figura 16: *Mapa de puntos de muestreo de suelo* 94

Resumen

La presente investigación surge a partir de la necesidad de conocer la dinámica de dos componentes importantes dentro de un ecosistema altoandino, es decir, la variación del carbono orgánico y productividad del suelo agrícola y de pastizales altoandinos en la localidad de Canrao, ubicado dentro de la provincia de Huanta de la región Ayacucho, el contexto metodológico de la investigación se enmarca dentro del enfoque cuantitativo, del tipo básico y el nivel descriptivo, cuyo objetivo es el de, evaluar la variación del carbono orgánico y productividad del suelo agrícola y de pastizales altoandinos en función sus características edáficas en la localidad de Canrao; para lo cual, teniendo como contexto poblacional la extensión territorial de la microcuenca Sullccapallcca se ha determinado 16 puntos de muestreo en las parcelas de suelos de vocación agrícola y de pastizal, de las que se obtuvo submuestras de suelo a una profundidad de 20 cm. para determinar el porcentaje de carbono orgánico del suelo (%COS) y la densidad aparente Da. Los resultados muestran que las zonas con pastizal almacenan en promedio 11.87% de COS siendo superior a zonas agrícolas que retienen 10.02%, la densidad aparente en zonas agrícolas fue mayor en promedio 1.13 g/cm^3 y en zonas con pastizal 1.06 g/cm^3, respecto al stock de COS las zonas de pastizal contienen mayor reserva en promedio 247.49 $Tn.ha^{-1}$ siendo superior a zonas agrícolas que almacenan 220.15 $Tn.ha^{-1}$; mientras que, la productividad de biomasa fue mayor en zonas agrícolas en relación a zonas de pastizal. Se concluye a partir de los resultados que el COS en sistemas altoandinos de la microcuenca del arroyo Sullccapallcca se aprecia mayor reserva de C en zonas de pastizal y mayor productividad en áreas agrícolas.

Palabras claves: Carbono orgánico, productividad primaria, NDVI.

Abstract

The present research arises from the need to know the dynamics of two important components within a high Andean ecosystem, that is, the variation of organic carbon and productivity of agricultural soil and high Andean grasslands in the town of Canrao, located within the Huanta province of the Ayacucho region, the methodological context of the research is framed within the quantitative approach, of the basic type and the descriptive level, whose objective is to evaluate the variation of organic carbon and productivity of agricultural soil and high Andean grasslands. based on its edaphic characteristics in the town of Canrao; For this purpose, taking as a population context the territorial extension of the Sullccapallcca micro-basin, 16 sampling points have been determined in plots of agricultural and grassland soils, from which soil subsamples were obtained at a depth of 20 cm. to determine the percentage of organic carbon (%COS) and the apparent density Da. The results show that areas with grassland store an average of 11.87% of SOC, being higher than agricultural areas that retain 10.02%, the apparent density in agricultural areas was higher on average 1.13 g/cm^3 and in areas with grassland 1.06 g/cm^3, with respect to Regarding the SOC stock, grassland areas contain a greater reserve on average 247.49 $Tn.ha^{-1}$, being higher than agricultural areas that store 220.15 $Tn.ha^{-1}$; while, biomass productivity was higher in agricultural areas in relation to grassland areas. It is concluded from the results that the SOC in high Andean systems of the micro-basin of the Sullccapallcca stream shows greater C reserves in grassland areas and greater productivity in agricultural areas.

Keywords: Organic carbon, primary productivity, NDVI.

I INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas altoandinos de los Andes peruanos son áreas de gran altitud caracterizadas por un clima riguroso, una rica biodiversidad y una importancia crítica tanto ecológica como cultural. La conservación y manejo sostenible de estos ecosistemas son fundamentales para mantener su integridad y los servicios que proporcionan; sin embargo, pese a esta importancia trascendental, es evidente, que estos espacios altoandinos, vienen siendo afectados por una serie de acciones antrópicas, como es la ganadería extensiva, ampliación de la frontera agrícola, los incendios provocados que esquilman la cobertura vegetal, estas acciones, en gran medida obedecen a una necesidad creciente de establecer cultivos de alimentos (Renison et al., 2011).

Este ecosistema particular, se encuentran en las altas montañas de los Andes, específicamente a altitudes que generalmente superan los 3,500 metros sobre el nivel del mar, precisamente, estas características son las que predominan en los ecosistemas de la microcuenca Sullccapalcca del centro poblado de Canrao, las que se constituyen en la fuente de provisión de diversos servicios ecosistémicos; sin embargo, los diferentes problemas generados por el hombre trascienden en diferentes impactos negativos sobre los componentes del medio ambiente; por ello, desde la perspectiva de la presente investigación ha sido necesario determinar las variaciones del carbono orgánico y la productividad de biomasa, así como el almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS), es de suma importancia, ya que contribuye en los diversos procesos ecológicos (López & Pardo, 2011), desde: provisión hídrica, almacenamiento de nutrientes y regulación de procesos climatológicos (Locatelli et al., 2009).

El ciclo de carbono cumple una función en el ecosistema altoandino, en el sentido que los pastizales aumentan las reservas de COS por medio de hojarascas y raíces finas (Sylvester et al., 2017). Para preservar la capacidad productiva del suelo es importante la sostenibilidad a largo

plazo de los ecosistemas altoandinos (Teague & Kreuter, 2020). En ese aspecto el contenido de COS en áreas agrícolas disminuye significativamente su reserva, debido a la erosión por malas prácticas de cultivo, fuego y sobrepastoreo (Lal, 2004). Estudios recientes han demostrado que la pérdida de COS conlleva a la degradación de la estructura del suelo, capacidad de infiltración y productividad primaria aérea, estas acciones tienen un efecto negativo en la infertilidad del suelo, cambios en el ciclo hidrológico y cambios climatológicos (Teague & Kreuter, 2020). Por otro lado, el pastoreo rotativo en zonas de pastizales mejora el almacenamiento de COS, debido a que no sucede simultáneamente una mayor carga animal por unidad de área (Rowntree et al., 2020). El secuestro de COS a una profundidad de 1 m de la superficie terrestre contiene en promedio 30 T/ha en tierras con clima árido en relación a suelos orgánicos que almacenan 80 T/ha (Lal, 2004) y 8% más en comparación de suelos desérticos (Yost & Hartemink, 2019). En ese sentido en un horizonte de 0 - 20 cm de la superficie del suelo provienen de hojarascas arbóreas y raíces finas (Lei et al., 2019). Por ello, la conversión de ecosistema nativo a agricultura genera disminución en la reserva de COS hasta un 60% en países en vías de desarrollo, en el cual la pérdida de COS desgasta la calidad del suelo reduciendo la productividad de biomasa (Lal, 2004). La expansión agrícola en zonas altoandinas ha conllevado a liberar gases de efecto invernadero afectando en el cambio climático y estabilidad estructural del suelo (Rolando et al., 2017), que trae como consecuencia la vulnerabilidad en las familias en el contexto de salud, economía y alimento (Bimal, 2017). Mientras tanto las condiciones climáticas de la zona, como la precipitación, favorecen la cobertura vegetal, trayendo como efecto positivo en el almacenamiento de COS en zonas de pastizales y matorrales (Shapkota & Kafle, 2021).

En ese sentido, el objetivo del estudio comprende evaluar la variación del contenido de carbono orgánico del suelo y productividad, en tierras agrícolas y pastizales de la microcuenca del

arroyo Sullccapallcca en el centro poblado de Canrao. Con la finalidad de estudiar el cambio en el uso del suelo, por malas prácticas agrícolas, ganaderas y acciones antropogénicas. Asimismo, propone mecanismos para el uso adecuado de cultivos y pastoreo. En ese contexto, la presente investigación será inicio de un trabajo a escala local en el centro poblado de Canrao y una posible guía del estado actual del ecosistema altoandino, como lo es el indicador de carbono orgánico del suelo.

II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Descripción del problema

El carbono orgánico en el suelo (COS) es una fracción del carbono total presente en el suelo, específicamente el carbono que se encuentra en las sustancias orgánicas, proviene principalmente de la descomposición de restos vegetales y animales, así como de microorganismos del suelo, es una parte esencial de la materia orgánica del suelo, que incluye sustancias como humus, residuos de plantas, raíces y compuestos orgánicos producidos por microorganismos (Hofstede et al, 2002). La disponibilidad de este carbono en el suelo, varía a lo largo del tiempo, es influenciada por diversos factores como las prácticas agrícolas, las condiciones climáticas, el uso del suelo, la vegetación y la actividad microbiana. La variación puede ser tanto positiva, indicando un aumento en el carbono orgánico, como negativa, indicando una disminución. Estos cambios son cruciales para entender la dinámica de la materia orgánica del suelo y su impacto en la fertilidad del suelo, la productividad agrícola y el ciclo global del carbono (Lal, 2004).

Siendo el carbono orgánico del suelo un componente importante de la fertilidad del suelo, en determinadas condiciones del ecosistema se encuentra sometido a las variaciones importantes. En condiciones de los pastizales, el sobrepastoreo es una de las acciones que reduce la vegetación

disminuyendo la cantidad de residuos vegetales que se incorporan al suelo, este hecho genera que haya menos materia orgánica disponible para descomponerse y formar humus; es decir, esto conlleva a la pérdida de vegetación y consecuentemente a la erosión del suelo, lo que reduce la cantidad de COS al eliminar la capa superficial rica en materia orgánica. Además, otro de los factores causales son los cambios en el uso del suelo, es decir, la conversión de pastizales a tierras agrícolas o a otros usos que generan la disminución del COS, pese a que los pastizales suelen tener niveles relativamente altos de carbono orgánico debido a la presencia constante de vegetación y a la acumulación de raíces y materia orgánica en el suelo (Lal, 2014).

En condiciones de suelos con vocación agrícolas, los factores que generan la variación del carbono orgánico del suelo son varias, entre ellas, según Reicosky & Allmaras (2003), la labranza intensiva es una de la acciones que expone el suelo al aire, acelerando la descomposición de la materia orgánica y reduciendo el COS; asimismo, el monocultivo constituye un proceso que agota los nutrientes y reduce la materia orgánica del suelo; por otro lado, como señalan Pimentel y Burgess (2013), el uso intensivo de fertilizantes químicos y pesticidas afectan negativamente a la biota del suelo, reduciendo la descomposición de la materia orgánica y, en consecuencia, los niveles de COS; además, en opinión de (Evans & Sadler, 2018), el riego excesivo conlleva a la lixiviación de nutrientes y materia orgánica, así como, el drenaje inadecuado acumula sales que afectan la materia orgánica del suelo.

De acuerdo a Huamán-Carrión, et al (2021) la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico en el suelo de los pastos naturales altoandinos está influenciada por la gradiente altitudinal y la temperatura del suelo. Por ello, es de mucha importancia conocer la contribución de los pastos naturales altoandinos en la captura del carbono bajo diferentes condiciones; sin embargo, siendo los pastos naturales altoandinos un potencial para la mitigación de la problemática

de los gases de efecto invernadero a nivel nacional, no es considerado en su amplitud en el proceso de captura y almacenamiento de carbono, por lo que, la acumulación de carbono orgánico en el suelo de estos ecosistemas, requieren ser estudiados con mayor interés. Específicamente, en las condiciones ecosistémicas del ambito del presente estudio, no se ha generado estudios que permita conocer la variación del carbono orgánico del suelo (COS).

La salud y la densidad del componente vegetal en suelos agrícolas y pastizales es otra de las preocupaciones que se genera por la relación estrecha que existe en la producción y consecuentemente con la variación del carbono orgánico del suelo; Sin embargo, tampoco existe estudio alguno en la Región Ayacucho que refleje la productividad de la biomasa tanto en los dos tipos de parcela a través de la determinación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

En términos concretos, la problemática respecto a la variabilidad del carbono orgánico del suelo y la productividad de la biomasa en las condiciones de suelos agrícolas y pastizales se identifica por los cambios y alteraciones edáficas, particularmente en sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Estas manifestaciones son evidentes en ambos tipos de suelos en el ámbito de estudio, que viene a ser, la microcuenca del Arroyo Sullccapallcca en el centro poblado de Canrao, motivo por el que, se plantea la presente investigación bajo el enunciado de Variación del carbono orgánico y productividad del suelo agrícola y de pastizales altoandinos en la localidad de Canrao, Huanta – Ayacucho.

2.2 Formulación del problema

2.2.1 Problema general

¿Cuál es la variación del carbono orgánico y productividad del suelo agrícola y de pastizales altoandinos en función sus características edáficas en la localidad de Canrao, Huanta – Ayacucho?

2.2.2 Problemas específicos

a. ¿Qué cambios presenta el carbono orgánico en suelo agrícola y pastizal en función a las propiedades edáficas del suelo?
b. ¿Qué cambios presenta la productividad primaria de biomasa vegetal en suelo agrícola y pastizal en términos de índice de vegetación de diferencial normalizada NDVI?
c. ¿Cuáles son las estrategias para el manejo de ecosistemas altoandinos en la microcuenca del arroyo Sullccapallcca?

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo general

Evaluar la variación del carbono orgánico y productividad del suelo agrícola y de pastizales altoandinos en función sus características edáficas en la localidad de Canrao, Huanta – Ayacucho.

2.3.2 Objetivos específicos

a. Determinar los cambios del carbono orgánico en suelo agrícola y pastizal en función a las propiedades edáficas del suelo.

b. Determinar cambios de la productividad primaria de biomasa en suelo agrícola y pastizal en términos de índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI.
c. Establecer las estrategias para el manejo de ecosistemas altoandinos en la microcuenca del arroyo Sullccapallcca.

2.4 Justificación e importancia

La problemática que va suscitando la sociedad hoy en día a nivel global, es el cambio en el uso del suelo a partir de la erosión de la tierra, debido a la deforestación, sobrepastoreo, malas prácticas agrícolas y factores externos (sedimentación e inundación) (Borrelli et al., 2017). El ecosistema altoandino de la microcuenca del arroyo Sullccapallcca en el centro poblado de Canrao no escapa a esta tendencia y viene siendo vulnerado en parte por los pobladores, debido al manejo inadecuado de cultivos y pastoreo incontrolado, afectando en la productividad primaria aérea y el almacenamiento de carbono orgánico del suelo, todo el accionar repercute en las alteraciones de servicios ecosistémicos, generando insatisfacción en el sector agrario y social, debido a una menor producción agraria y ganadera (Alcántara, 2014). Para ello, en la comunidad de Canrao se busca mejorar el manejo sostenible de ecosistemas altoandinos, como es la fertilidad del suelo que es de suma importancia agrario, económico y ecológico, con la finalidad de aumentar la productividad agrícola y ganadera, por ende, la condición de vida de dicha población.

A partir del trabajo de investigación de la variación del carbono orgánico y productividad del suelo agrícola y de pastizales altoandinos en la localidad de Canrao, Huanta – Ayacucho, busca como alternativa proponer estrategias adecuados en los ecosistemas altoandinos y minimizar la vulnerabilidad de las familias que es de suma

importancia. Para ello se recorrerió el área de estudio con un navegador GPS, para georreferenciar permitiendo identificar la altitud de los puntos muestreados de la microcuenca del arroyo Sullccapallcca en el centro poblado de Canrao, consecutivamente se realizó análisis satelital para ver el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), con la finalidad de visualizar el cambio de cobertura vegetal en el periodo (2013 - 2021) (Carbajal & Onofre, 2020).

Dada la falta de antecedentes de este tipo de estudios en la región, el presente trabajo es pionero que proporciona información recopilada y busca aportar conocimientos relacionados a los efectos del cambio en el uso del suelo, sobre un importante indicador del estado del suelo como lo es el stock de carbono orgánico edáfico en la comunidad de Canrao, así mismo el presente estudio queda como referencia para investigaciones posteriores que pretendan realizar en temas relacionados. De igual modo, permitirá predecir el impacto de futuros cambios en el uso del suelo sobre el stock de CO e identificar estrategias para la planificación del uso del suelo que minimicen las emisiones de C del suelo. En ese sentido, los resultados permiten comprender mejor los servicios ecosistémicos de soporte teniendo implicancias en la planificación ambiental del territorio tal como la Zonificación Económica y Ecológica.

2.5 Hipótesis

2.5.1 Hipótesis general

La evaluación de los suelos agrícolas y de pastizales altoandinos en función a sus características edáficas, determina el stock de carbono orgánico en la localidad de Canrao, Huanta – Ayacucho.

2.5.2 Hipótesis específicas

a. La determinación del carbono orgánico en suelos agrícolas y pastizales en función a las propiedades edáficas del suelo contribuye a la determinación del stock de COS.
b. La determinación de cambios en la productividad primaria de biomasa vegetal en suelo agrícola y pastizal en términos de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) permite conocer el estado de salud del ecosistema altoandino.
c. El establecimiento de estrategias para el manejo de ecosistemas altoandinos, garantiza la sostenibilidad ambiental en la microcuenca del arroyo Sullccapallcca.

2.6 Variable

La variación del Carbono Orgánico del Suelo es un fenómeno que ocurre en la naturaleza, depende de las propiedades edáficas del suelo y la productividad primaria de la biomasa vegetal en un determinado espació físico; por tanto, este fenómeno contribuye en la salud del ecosistema. Sin embargo, la sostenibilidad de la generación del Carbono Orgánico del Suelo, depende de las estrategias empleadas dentro de los ecosistemas altoandinos (Jobbágy et al., 2002; Milleret et al., 2009).

Tabla 1.

Operacionalización de la variable de investigación, variación del carbono orgánico, dimensiones e indicadores.

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	UNIDAD	INSTRUMENTOS	FUENTE
Variación del carbono orgánico.	La variación del Carbono Orgánico del Suelo es un fenómeno que ocurre en la naturaleza, depende de las propiedades edáficas del suelo y la productividad primaria de la biomasa vegetal en un determinado espació físico; por tanto, este fenómeno contribuye en la salud del ecosistema. Sin embargo, la sostenibilidad de la generación del Carbono Orgánico del Suelo, depende de las estrategias empleadas dentro de los ecosistemas altoandinos (Jobbágy et al., 2002; Milleret et al., 2009)	D1: Propiedades edáficas del suelo	Densidad aparente	g/cm^3	Anillo, balanza analítica, estufa	Características del suelo de ambos lotes
			Materia orgánica	%	Calador, balanza analítica, mufla	
			Profundidad del suelo	m	Cinta métrica	
		D2: Productividad primaria de biomasa vegetal	NDVI	Longitud de onda	QGIS	Imágenes multiespectrales
			Suelo agrícola	Unidad	Google earth, GPS	Suelos bajo agricultura y pastizal
			Pastizal	ha		
		D3: Estrategias para el manejo de ecosistemas altoandinos	Tecnologías viables para el manejo del ecosistema	Unidad	Ficha de diagnóstico	Información in situ

III MARCO TEÓRICO

3.1 Antecedentes

3.1.1 Antecedentes investigativos a nivel internacional

La cobertura vegetal se vincula con la productividad en relación a condiciones medioambientales y ecológicas, que producen cambios vinculados a degradación del suelo a largo plazo. Los servicios ecosistémicos vienen siendo afectados en su mayoría por la subsistencia del ser humano, afectando en particular en el contenido de COS (De la Fuente et al., 2020).

El ecosistema altoandino cumplen una función relevante en el ciclo del carbono dado que los pastizales almacenan una alta cantidad de COS (Sylvester et al., 2017). Para preservar la capacidad productiva del suelo es importante considerar la sostenibilidad a largo plazo de los ecosistemas altoandinos (Teague & Kreuter, 2020). En ese sentido, el almacenamiento de COS es un componente clave en el ecosistema. Sin embargo, diversos trabajos en distintas regiones del mundo muestran que en lotes agrícolas el contenido de COS disminuye sensiblemente en relación a los ecosistemas naturales (Lal, 2004). Estudios recientes han demostrado que la pérdida de COS conlleva a la degradación de la estructura del suelo, la capacidad de infiltración y la productividad primaria, y estas acciones trae como consecuencia la infertilidad del suelo, cambios en el ciclo hidrológico y hasta eventualmente cambios climatológicos (Teague & Kreuter, 2020). Por otro lado, el pastoreo rotativo en zonas de pastizales puede mejorar el almacenamiento de COS, los cuales pueden llegar a almacenar más del 30% de carbono orgánico del suelo a nivel mundial (Rowntree et al., 2020).

El almacenamiento de carbono orgánico del suelo varia por la gradiente altitudinal, disminuyendo a mayor altitud, por factores ambientales y antrópicos, influyendo en el secuestro de carbono a diferentes gradientes altitudinales, en zonas de bosques y parámo (Calderón et al.,

2020). La evaluación del almacenamiento de carbono y el recurso hídrico en Shaanxi, examinaron la compensación del stock de carbono y el recurso hídrico, resultando en los suelos de conservación incrementaba a menudo el rendimiento hídrico y la producción primaria descendía (Ma et al., 2021). El incendio en América Latina y el Caribe, trae un impacto negativo en el ecosistema, causando el incremento de la temperatura terrestre, generando escasez del recurso hídrico en la superficie del suelo (Martinelli, 2012).

El almacenamiento de carbono y la productividad primaria aérea, está en relación a condiciones ambientales, generando incremento y disminución, por presencia de precipitación y temperatura. Estudios previos se enfocaron en realizar muestreos homogéneos, en áreas de pastizal, bosque y matorral, tomando en cuenta la precipitación, radiación fotosintética y temperatura. Se recolectaron las muestras en profundidad de 0 - 30 cm, en zonas diversas de cobertura vegetal, resultando que las altas temperaturas y precipitaciones tienen una relación negativa con el almacenamiento de COS en mayoría de la biomasa excepto en los pastizales (Chen, Wang, et al., 2018).

El almacenamiento de carbono en el suelo varia por sus características edáficas propias. Un estudio realizado recolectó muestras de tres zonas de cultivo en distintos tratamientos de profundidades que oscilan entre 20 – 30 cm, que muestran que la capa superior es más significativo a comparación de la capa inferior, por lo tanto el carbono orgánico del suelo disminuye en sistema de cultivo a menudo que aumente la profundidad del suelo (Lopez & Pardo, 2011). Los suelos del bosque tienen mayor secuestro de carbono, debido a hojarascas y raíces, mientras los suelos de pastizal vienen siendo degradados, en gran parte, por el sobrepastoreo (Chen, Arrouays, et al., 2018). La agricultura y el pastoreo extensivo altera el uso del suelo, afectando en la densidad aparente y materia orgánica, en ese sentido la práctica del pastoreo controlado tiene como efecto

positivo en el almacenamiento de carbono en áreas de pastizal (Sainepo et al., 2018). El almacenamiento de carbono orgánico, varia debido a la profundidad del suelo y la cobertura vegetal, la acumulación de carbono a 20 cm de profundidad almacena un porcentaje de 33% a 42%, en relación a la profundidad del suelo en matorrales y pastizales (Shrestha & Stahl, 2008).

(Villarino et al., 2019) en su artículo "How does soil organic carbon mediate trade-offs between ecosystem services and agricultural production?", tuvieron como objetivo de explorar la variación espacial de las compensaciones entre la producción agrícola y los servicios ecosistémicos intervenidos por el carbono orgánico del suelo en las principales regiones agrícolas de Argentina. El tipo de investigación es aplicado, de nivel descriptivo correlacional, utilizaron un diseño de investigación observacional no experimental, tuvieron un enfoque que se centró en la variación espacial de las compensaciones entre la producción agrícola y los servicios ecosistémicos influidos por el carbono orgánico del suelo en diferentes subregiones de Argentina. En la técnica de obtención datos se recopilaron datos de 161 condados que abarcan seis subregiones mediante mediciones de carbono orgánico del suelo, cambios en el uso del suelo y niveles de producción agrícola; para el análisis estadístico se realizaron modelos lineales generales para explorar las relaciones entre el suministro de servicios ecosistémicos, el carbono orgánico del suelo, la cobertura natural y la producción agrícola a lo largo del tiempo y en diferentes regiones. Sus resultados revelaron que existen diferencias significativas en la sensibilidad del suministro de servicios ecosistémicos generados por cambios en el carbono orgánico en el suelo (SOC) y la cobertura natural entre subregiones, se observó una variación de compensaciones entre la producción agrícola y los servicios ecosistémicos, y se identifican relaciones específicas entre el SOC y la oferta de servicios ecosistémicos en diferentes condiciones ambientales. Concluyen que la expansión agrícola sobre áreas naturales ha generado compensaciones entre la producción y el

suministro de servicios ecosistémicos; la expansión agrícola sobre áreas naturales puede conllevar costos ambientales significativos, especialmente en regiones ambientalmente frágiles como el Chaco Semiárido, y el papel del carbono orgánico en el suelo como mediador clave entre la producción agrícola y los servicios ecosistémicos es evidente en este estudio. Los resultados resaltan la sensibilidad de estos servicios al cambio en los niveles de carbono orgánico, subrayando su importancia crítica en la salud general del suelo. Así mismo la preservación y promoción del carbono orgánico en el suelo son fundamentales para mantener un equilibrio armonioso entre la producción agrícola y la integridad del ecosistema.

(Winowiecki et al., 2014) con su artículo de título "Effects of land cover on ecosystem services in Tanzania: A spatial assessment of soil organic carbon", donde su objetivo era valuar los efectos de la cobertura del suelo en los servicios ecosistémicos en Tanzania, centrándose específicamente en una evaluación espacial del carbono orgánico del suelo (COS). El tipo de investigación fue aplicada, el nivel se sitúa en el ámbito exploratorio y descriptivo, su diseño de investigación fue observacional, donde realizaron mediciones y recopilación de datos sin manipular las variables, con un enfoque cuantitativo para la evaluación de los servicios ecosistémicos, la técnica de estudio usado fue el Marco de Vigilancia de la Degradación de la Tierra (LDSF) para evaluación de métricas de salud de la tierra, realizaron encuestas y mediciones a nivel de parcela y subparcela, recolectaron muestras de suelo a dos profundidades para análisis de laboratorio, y se empleó espectroscopia de infrarrojo medio para la predicción de propiedades del suelo; para el análisis de datos aplicaron modelos de efectos lineales mixtos para analizar los efectos del uso de la tierra y la erosión en el COS, también usaron un modelo global de predicción de bosque aleatorio para la predicción de propiedades del suelo a partir de datos espectrales. En sus resultados obtuvieron patrones espaciales significativos en los niveles de COS en relación con

la cobertura del suelo; así mismo, se observó una disminución general del COS debido a la actividad de cultivo, con una variabilidad considerable entre sitios; por otro lado, la erosión del suelo también tuvo un impacto negativo en el COS. En las conclusiones destacan la complejidad y variabilidad de las propiedades del suelo, degradación, cobertura vegetal y uso del suelo; además la disminución general del COS debido al cultivo fueron significativas entre sitios; por último la disminución general del COS marcada por la erosión del suelo, subraya la necesidad de abordar de manera efectiva las prácticas agrícolas y de manejo de la tierra para conservar y mejorar la salud del suelo y contribuir a la mitigación del cambio climático al preservar las reservas de carbono en el suelo.

(Ordoñez et al., 2015) en su investigación "Effects of peasant and indigenous soil management practices on the biogeochemical properties and carbon storage services of Andean soils of Colombia" con el objetivo de investigar los efectos de las prácticas de manejo del suelo por campesinos e indígenas en los servicios de almacenamiento de carbono de los suelos andinos de Colombia. El tipo de investigación usado fue aplicada, de tipo experimental longitudinal, con un enfoque cuantitativo; para el análisis físico se utilizó el método Bouyoucos para determinar la textura de las muestras, en el análisis químico se midió el pH, el carbono orgánico total, el nitrógeno total, entre otros, utilizando métodos estándar como el potenciométrico y el método de Kjeldahl y para el análisis biológico se estimó la biomasa microbiana-C y la actividad microbiana midiendo la producción de CO2; en tratamiento de datos se utilizó un análisis de varianza de medidas repetidas (RMANOVA) para las variables físicas, químicas y microbianas del suelo; se realizaron análisis de correlación de Pearson para examinar las relaciones entre diversas variables del suelo. Obtuvieron que la densidad aparente del suelo fue afectada por las prácticas de manejo del suelo, siendo menor en el sistema de pastoreo natural; el suelo de pastoreo natural tenía mayor

contenido de carbono orgánico a comparación de suelos de bosque y cultivo de forraje; observaron fluctuaciones temporales en el contenido de carbono del suelo, habiendo un incremento de COS con el inicio de la temporada lluviosa especialmente en el suelo de bosque, el suelo de pastoreo natural es más eficiente para retener carbono en comparación con el suelo de bosque y cultivo de forraje. Concluyen que las prácticas de manejo tradicionales en la región andina son exitosas en la productividad agrícola con bajos niveles de tecnología y recursos limitados, sin degradar los suelos.

(Lavelle et al., 2014) en su artículo "Soil Ecosystem Services and Land Use in the Rapidly Changing Orinoco River Basin of Colombia" su objetivo era evaluar los servicios del ecosistema del suelo en la región de Altillanura, en la Cuenca del río Orinoco de Colombia, que ha experimentado cambios significativos por el uso del suelo, se buscó comprender cómo diferentes prácticas de uso del suelo afectan los servicios del ecosistema del suelo. El tipo de investigación fue básico observacional, de nivel descriptivo y explicativo; usaron un diseño no experimental; enfoque es cuantitativo y cualitativo, combinando mediciones numéricas y observaciones cualitativas; se recopilaron datos mediante muestreo de suelos en diferentes sistemas de producción (pastizales mejorados, plantaciones de palma y caucho, cultivos anuales); realizaron un análisis estadístico descriptivo y comparativo de los datos recopilados, utilizando ANOVA y análisis de componentes principales. Obtuvieron que la fertilidad química del suelo es mayor en los sistemas de cultivos anuales, en pastizales mejorados se observa una mejora en la comunidad de macroinvertebrados y la estabilidad del suelo; del análisis de componentes (PCA) muestra una clara separación de las parcelas en función a la fertilidad del suelo, siendo sistemas de cultivos anuales que tiene valores más altos; el carbono en los sistemas de producción se almacena principalmente como materia orgánica del suelo, existiendo diferencias significativas en el

almacenamiento total de carbono y siendo las plantaciones de palma que tienen mayor valor. Concluyen que los suelos de la región de Altillanura presentan baja fertilidad, y el cambio por el uso del suelo ha tenido impactos significativos en las propiedades del suelo; los pastizales mejorados muestran un aumento en la comunidad de macroinvertebrados y una mayor estabilidad del suelo en comparación con otros sistemas de producción.

(Fan et al., 2016) con su artículo científico "Valuation of Ecosystem Services in Organic Cereal Crop Production Systems with Different Management Practices in Relation to Organic Matter Input", tuvieron el objetivo de analizar el impacto económico de las prácticas de manejo en sistemas de cultivos de cereales orgánicos a lo largo de 15 años para comprender las compensaciones entre los servicios del ecosistema que tienen un valor de mercado y aquellos que no lo tienen, en relación con las prácticas específicas de manejo del suelo y la entrada de materia orgánica. El tipo de investigación es aplicada, el nivel de investigación es exploratorio y descriptivo; el diseño de Investigación es del tipo longitudinal, llevándose a cabo durante 15 años, con enfoque cuantitativo y cualitativo; recopilación de datos a lo largo de 15 años en sistemas de producción de cultivos de cereales orgánicos; cuantificaron los servicios del ecosistema como el rendimiento de cultivos, fijación de nitrógeno, población de lombrices, cuantificación de carbono por kilo de suelo; se analizaron los datos comparando las medias, usaron el ANOVA y las represión lineal; sus resultados arrojaron que el sistema con mayor entrada de materia orgánica mostró niveles significativamente más altos de nitrógeno del suelo, carbono orgánico y retención de agua en el suelo (770 mm) en la capa de arado superior; en el sistema manejado con materia orgánica, contribuyó a la secuestro de carbono en el suelo en la capa de arado con alrededor de 408 y 187 kg/ha/año, respectivamente; la densidad aparente del suelo disminuyó con el aumento de la entrada de materia orgánica; el sistema con más entrada de materia orgánica tuvo el mayor valor en

servicios ecosistémicos. El sistema de pasto tuvo una mayor relación Carbono/Nitrógeno (12:1) que los otros cultivos, debido a una mayor biomasa de raíces a comparación con los cereales, esto indica que las raíces de pasto contribuyen más al secuestro de carbono en el suelo que los cultivos de cereales. Concluyeron que las prácticas de manejo orgánico con diferentes niveles de entrada de materia orgánica afectan significativamente a los servicios del ecosistema y la rentabilidad económica.

(Stavi et al., 2016) en su investigación de título "Soil functions and ecosystem services in conventional, conservation, and integrated agricultural systems. A review", con el objetivo de analizar las funciones del suelo y los servicios del ecosistema en sistemas agrícolas convencionales, con la finalidad de realizar una revisión exhaustiva para comparar y evaluar el impacto agroambiental de estos diferentes enfoques agrícolas. El tipo de investigación fue el aplicado, no se contempla un diseño experimental, la investigación se basa en la revisión de artículos científicos y la síntesis de estudios; tiene un enfoque de revisión y evalúan aspectos cuantitativos y cualitativos en diferentes sistemas agrícolas; la técnica que usaron fue la revisión bibliográfica de estudios previos relacionados con las funciones del suelo y los servicios del ecosistema en sistemas agrícolas convencionales. De las revisiones realizadas mostraron resultados como el impacto negativo de la mala calidad física del suelo, aumenta las emisiones de gases de efecto invernadero y degrada los servicios ecosistémicos a largo plazo, se incrementa la erosión del suelo y se reducen los niveles de secuestro e carbono del suelo; la ausencia de disturbios en el suelo favorece la acumulación de materia orgánica, contribuyendo al secuestro de carbono; el uso de materia orgánica como, como el estiércol de ganado, incrementan los niveles de carbono orgánico en el suelo, mejorando la calidad del suelo y proporcionando beneficios a la salud del suelo, la retención y acumulación de carbono en el suelo se considera beneficioso para múltiples

servicios ecosistémicos, incluida la mejora de la salud del suelo, la conservación del agua y la contribución a la mitigación del cambio climático. Concluyen que la acumulación de carbono en el suelo está estrechamente relacionada con la prestación de servicios ecosistémicos beneficiosos y con la promoción de sistemas agrícolas sostenibles.

3.1.2 Antecedentes investigativos a nivel nacional

El Perú contempla una diversidad extensiva de servicios ecosistémicos que beneficia a la humanidad, y a la vez hacen uso de ellos con la finalidad de mejorar la calidad de vida de las personas (Locatelli et al., 2009). El impacto negativo al ecosistema puede alterar el funcionamiento de los servicios ecosistémicos, por ende, su aporte local. Cabe mencionar que los impactos negativos pueden ser de origen natural o por acción antropogénica, el impacto de origen natural se debe a un sismo, erupciones volcánicas, escenas meteorológicas, huracán, entre otros, mientras el impacto negativo que más aqueja un ecosistema es el cambio de cobertura vegetal y el cambio del uso de suelo, debido a la ampliación de la frontera agrícola, sobrepastoreo y cultivo. Por lo tanto, evaluar los servicios ambientales conlleva a proponer estrategias de mitigación y conservación.

El ecosistema de los andes son de prioridad por sus concentraciones elevadas de carbono orgánico del suelo, que es primordial para sostener los servicios ecosistémicos. Estudio realizado al oeste del departamento de Cajamarca, con altitudes que oscilan de 3500 a 3720 m.s.n.m. determinaron la densidad aparente y carbono orgánico del suelo, en zonas humedas y secas de suelo calcáreo y roca ígnea ácida, la concentración de COS resulto mayor para suelos calcáreos de zonas húmedas (405,3 ± 41,7 $Mg.ha^{-1}$), los suelos calcáreos de sitio seca fueron más significativos en relación a los demás suelos (Yang et al., 2020). Por otra parte, investigaciones realizadas en la puna tropical altoandina determino que el carbono orgánico del suelo en pastizales de la puna húmeda del Perú almacenaba 11,9 kg cm^{-2}, en una profundidad de 32,5 cm del suelo (Rolando et

al., 2017). Por otro lado, los pastizales altoandinos en el centro del Perú almacenan un 28.476 TC/ha en un horizonte de 0 - 10 cm, debido a la rizodeposición y raíces finas que se descomponen en la capa superior del suelo (Zanabria & Cuellar, 2015).

Los diversos ecosistemas en los sistemas altoandinos del Perú, están ligados al cambio en el uso del suelo. Un estudio realizado tomó en cuenta el espacio temporal avarcando 25 provincias de la zona altoandina de los andes centrales, consistiendo la dinámica del suelo y las tendencias de los servicios ecosistémicos, resultando una disminución ligera del servicio de regulación y provisión en las provincias de Huaytara, Junín y Castrovirreyna en un 3% de cambio de tierra, mientras en la provincia de Huanta y Churcampa se registró un cambio de tierras de 12% - 19% y 70% debido en gran medida por la deforestación para dicha provincia (Madrigal & Miralles, 2019). Por otro lado, en la provincia de Jauja se realizó un estudio para determinar el carbono orgánico del suelo en zonas de pastizal, se recolectaron muestras de 15 cm de profundidad, determinando que el secuestro de carbono en el suelo de césped es de 5.60 $T.ha^{-1}$, así mismo en sistemas de pajonal de festura se registró mayor almacenamiento de 7.1 $Tn.ha^{-1}$, finalmente para el pajonal *stipa* se registró 6.16 $Tn.ha^{-1}$ de secuestro de carbono (Quispe, 2017).

(Canaza et al., 2023) en el artículo científico “Spatial Distribution of Soil Organic Carbon in Relation to Land Use, Based on the Weighted Overlay Technique in the High Andean Ecosystem of Puno – Peru”, con el objetivo de determinar el mapeo de la distribución espacial del carbono orgánico del suelo en relación con el uso de la tierra. El tipo de estudio que realizaron fue descriptivo, nivel de investigación relacional, realizaron un muestro sistemático de 20 puntos (profundidades: 0-20 cm, 20-45 cm, 45-105 cm), técnica se basó en el mapeo libre según DS N° 013-2010-AG, con un enfoque cualitativo y cuantitativo, los instrumentos que usaron fueron el sistema de posicionamiento global (GPS), NDVI, análisis fisicoquímicos, método de oxidación de

carbono orgánico del suelo, pH, densidad aparente; se realizó el análisis geoestadístico con kriging ordinario, análisis de correlación de Pearson y análisis de superposición ponderada. De los resultados de la distribución espacial del carbono orgánico del suelo, mostró una mayor concentración en la parte superior de la microcuenca, relacionada con altitud y variables climáticas; la altitud y factores climáticos, como precipitación y temperatura, influyeron significativamente en las reservas de carbono orgánico; la parte baja de la cuenca con intensa actividad agrícola tiene menores valores de carbono orgánico del suelo; la parte media que tiene menor actividad antrópica, presentó tasas intermedias de carbono orgánico. Se concluye de este estudio de 53 muestras de suelo en profundidades de 0 a 105 cm para determinar el carbono orgánico del suelo en kg/cm2; las áreas con uso agrícola intensivo mostraron bajas reservas de carbono orgánico (0-3 kg/m²), indicando pérdida de carbono, mientras que áreas sin actividad agrícola exhibieron mayores reservas (3-7 kg/m²).

(Rolando et al., 2017) en su artículo de investigación "Key ecosystem services and ecological intensification of agriculture in the tropical high-Andean Puna as affected by land-use and climate changes", con el objetivo analizar bibliográficas científicas sobre los servicios ecosistémicos clave de almacenamiento de carbono y la intensificación de producción agrícola en la puna altoandina Peruana, y como son afectados por los cambios en el uso del suelo y el clima. El tipo de investigación usado fue aplicada, de nivel descriptivo analítico, no experimental que abordan cambios en los servicios ecosistémicos y la intensificación agrícola, enfocado en diversos factores como cambios en el uso del suelo, impactos del cambio climático y actividades agrícolas; obtuvieron datos a través de la revisión bibliográfica, análisis de estudios recientes y evaluación de datos empíricos. Los autores resaltan la importancia de la región puna en su papel de provisión de servicios ecosistémicos como, la acumulación de carbono orgánico en el suelo, regulación del

agua; por otro lado, revelan que el cambio climático y la intensificación agrícola afectan negativamente a los servicios ecosistémicos y como consecuencia significativa la baja fertilidad del suelo. Concluyen que la región puna es de gran importancia ecológica debido a que albergan biodiversidad nativa, proveen servicios ecosistémicos para las zonas bajas, stocks significativos de carbono orgánico y productividad agrícola; resaltan la amenaza de la erosión del suelo, la necesidad de prácticas de conservación del suelo y la importancia de abordar la escasez de agua.

(Palareti et al., 2016) en su investigación "Land use as a driver of soil fertility and biodiversity across an agricultural landscape in the Central Peruvian Andes" el objetivo de este estudio es analizar las diferencias en las propiedades físicas y químicas del suelo, así como en la abundancia y diversidad de macroinvertebrados del suelo y la vegetación, en función de distintos usos del suelo en un paisaje agrícola andino. El tipo de estudio es aplicado basado en la observación y medición de variables en el campo, de nivel descriptivo-explicativo, de diseño de investigación no experimental con enfoque cuantitativo, la técnica de obtención de datos se realizó mediante muestreo de suelos y recolección de macroinvertebrados en diferentes zonas y tipos de uso del suelo en el paisaje agrícola, se aplicaron análisis estadísticos, ANOVA y para evaluar las diferencias entre los usos del suelo y la variabilidad en las propiedades del suelo, la abundancia de macroinvertebrados y la diversidad vegetal. Los resultados que obtuvieron, revelan diferencias significativas en propiedades físicas y químicas del suelo entre diferentes usos del suelo y zonas de elevación; las altitudes más altas presentan niveles más altos de materia orgánica del suelo, carbono activo y capacidad de intercambio catiónico. La vegetación y la macrofauna del suelo también muestran variaciones sustanciales entre los tipos de uso del suelo, como pastizales degradados presentando la menor fertilidad del suelo y diversidad biológica. Concluyen que la altitud tiene fuertes efectos en las materia orgánica, propiedades físicas y químicas del suelo; las

zonas de menor elevación, especialmente en pastizales degradados, la presencia limitada de materia orgánica está asociada con una disminución en la fertilidad del suelo; la gestión adecuada de la materia orgánica del suelo se presenta como una estrategia clave para mantener la fertilidad del suelo y preservar la biodiversidad en paisajes agrícolas.

3.1.3 Antecedentes investigativos a nivel regional

El gobierno regional y local: “Desarrollan e implementan planes de desarrollo concertado incorporando el valor del ecosistema, diversidad biológica y el ordenamiento territorial en cumplimiento de la normatividad ambiental y las políticas de desarrollo rural” (Quiroz, 2018, pág. 8).

La provincia de Huanta posee mayores zonas de vida en el ámbito territorial: “Esto se debe a que la provincia abarca 2 ecorregiones (Puna y Selva Alta), además en su territorio está ubicado la línea imaginaria que limita las regiones latitudinales Tropical y Sub Tropical” (Portal & Chavez, 2021, pág. 12). Para disminuir la imposición de la diversidad biológica producido por la deforestación, cambio de uso del suelo y el aprovechamiento irracional de recursos, se busca contemplar mecanismos que articulen mantener los servicios ecosistémicos, articulando actividades de conservación de diversidad biológica con enfoque de gestión compartida. Los bienes y servicios de los recursos naturales cada día son más apreciados y valorizados. (Portal & Chavez, 2021).

El recurso hídrico en los bofedales, cumple una función indispensable en la regulación hidrológica. Los bofedales se caracterizan por captar mayor precipitación, menores temperaturas y baja evapotranspiración. La carga animal, así como también la urbanización afecta en su ecosistema, los bofedales son considerados por contar con un alto potencial de fauna silvestre y

flora, de igual modo regula la recarga hídrica, suministra almacenamiento de agua y brinda servicios ecosistémicos mediante el flujo hidrológico (Gómez, 2016).

3.2 Bases teóricas

3.2.1 Servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos son beneficios directos e indirectos que la sociedad obtienen de los ecosistemas, clasificándose en cuatro categorías:

Provisionales: Son los bienes tangibles que se obtiene directamente de los ecosistemas., siendo alimentos, agua potable, madera, leña etc.

Reguladores: Incluyen la regulación del clima, purificación del agua, polinización de las plantas por insectos y regulación de plagas por controladores naturales.

Culturales: Son beneficios no materiales que incluyen belleza escénica paisajística, la recreación en un ambiente natural y la inspiración artística.

De soporte: siendo necesarios para generar los demás servicios ecosistémicos, donde se incluye la formación del suelo, el ciclo de nutrientes y la fotosíntesis (Locatelli et al., 2009).

En la actualidad se aborda desafíos relacionados con la conservación de los servicios ecosistémicos que se intensifican por modificaciones humanas en los ecosistemas y cambios abruptos en regímenes ecológicos, siendo alguno de los problemas como la caza de insostenible y la degradación de ecosistemas por actividades de extracción (Carpenter et al., 2006), pero se exploran desafíos en el diseño e implementación de políticas, como los esquemas de pago por servicios ecosistémicos para destinar fondos para su conservación (Daily & Matson, 2008).

3.2.2 Ecosistemas altoandinos

Representan una diversidad de ecosistema primordial, así como el parámo, los humedales de montaña, que vienen siendo afectados por el cambio climático y la acción antropogénica, sobrepastoreo, ampliación de la frontera agrícola, malas prácticas agrícolas y la urbanización. Los sistemas altoandinos son de prioridad, debido a su contenido de carbono en el suelo, se menciona que alrededor de 98% es almacenado en ecosistemas de montaña (Bonell, 2018).

3.2.3 Expansión agrícola y cambio de uso del suelo

En la actualidad se destaca que la expansión agrícola no es uniforme, y se viene incrementando por la continua demanda de alimentos de la población llevando a la disminución de la capacidad del ecosistema para fijar carbono atmosférico y alterando la regulación hídrica y acelerando la erosión del suelo, además se tiene registros que la biodiversidad pasa por su momento más crítico por el cambio de uso de suelo (Paruelo et al., 2005). Cambios en el uso del suelo reflejan el futuro de la humanidad y a menudo siguen de cerca las tasas de crecimiento de la población; la mayor parte de los 10,000 años de historia de la agricultura sedentaria ha generado que el cambio de uso del suelo se haya dispersado en el tiempo y el espacio que han generado complejidad de interacciones entre la actividad humana, el uso del suelo y los impactos ambientales, y se destaca la necesidad de abordar cuestiones desde una perspectiva global, considerando tanto los efectos locales como los globales para mejorar nuestro entorno. (Houghton, 1994). La obtención de productos animales, como carne, leche y huevos, ha sido identificada como el principal impulsor del cambio en el uso de la tierra agrícola que representa el 65% del cambio total en el uso de la tierra en los últimos 50 años, así mismo la superficie global de pastoreo incremento 298 millones de hectáreas, lo que contribuye a un aumento total de 439 millones de hectáreas en el uso de la tierra para la producción animal (Alexander et al., 2015).

3.2.4 Biomasa vegetal y las propiedades del suelo

La biomasa vegetal es la cantidad total de material orgánica producido por plantas producto de la fotosíntesis, siendo almacenado en forma de tejidos vegetales. Esta biomasa numerosas interacciones y efectos en las propiedades del suelo (Abdul Khalil et al., 2015).

Materia Orgánica del Suelo (MOS): La biomasa vegetal contribuye a la materia orgánica del suelo, las plantas generan tejido vegetal que llega a morir, descomponen y se depositan en el suelo. Siendo entonces el MOS crucial para la salud del suelo, mejorando su estructura, retención de agua y la disponibilidad de nutrientes, del mismo modo las raíces de las plantas crean canales en el suelo para mejorar la infiltración del agua para reducir la escorrentía superficial (Milleret et al., 2009).

Ciclo de Nutrientes: la vegetación extrae nutrientes del suelo para crecer. Si estas llegan a cumplir su ciclo de vida, devuelven estos nutrientes al suelo por el proceso de descomposición microbiana, siendo esencial para mantener la fertilidad del suelo (Hooper & Vitousek, 1998).

La biomasa vegetal desempeña un papel importante en la salud del suelo y sustentabilidad de los ecosistemas terrestres, ayuda a prevenir la erosión del suelo al proporcionar estabilidad y resguardarlo de la acción del viento y agua, así mismo, la biomasa vegetal influye en la actividad microbiana en el suelo, siendo los residuos vegetales que proporciona alimento para los microorganismos (Liu et al., 2010).

3.2.5 Productividad y pérdida de nutrientes

La expansión agrícola tiene impactos tanto positivos y negativos en la productividad del suelo. Por el lado positivo, la conversión de áreas naturales en tierras para cultivo puede aumentar la productividad al proporcionar espacio para prácticas agrícolas intensivas. Por otro lado, la deforestación y la alteración de los ecosistemas naturales disminuyen la productividad del suelo al

complicar los ciclos naturales de nutrientes y reducir la materia orgánica del suelo (Viglizzo et al., 2011).

El cambio en el uso del suelo, a menudo es relacionado con la pérdida de nutrientes del suelo (Rahman, 2003). Las áreas naturales antes de los disturbios suelen ser suelos ricos en materia orgánica y nutrientes, cuando cambian su uso por la agricultura, se liberan nutrientes en forma de gases o se lixivian por efecto de la lluvia, resultando en la degradación del suelo y la pérdida de su fertilidad (McLauchlan, 2006), en lugar de que los nutrientes se reciclen dentro del ecosistema, la agricultura implica la extracción intensiva de nutrientes del suelo para mantener el rendimiento elevado lo que puede llevar a una disminución sostenida de la fertilidad del suelo (Neina & Agyarko-Mintah, 2022).

3.2.6 Erosión del suelo

La amenaza de la erosión del suelo destaca la magnitud del problema, sus impactos devastadores en la productividad de los ecosistemas y la seguridad alimentaria global. La erosión del suelo se ha convertido en una preocupación crítica a nivel mundial, afectando tanto a las tierras agrícolas como a los ecosistemas naturales. Esta magnitud se refleja en estadísticas alarmantes, con aproximadamente el 80% de las tierras agrícolas mundiales presentan erosión moderada a severa. La pérdida promedio de suelo debido a la erosión se estima en 30 toneladas por hectárea por año, con consecuencias significativas para la capacidad de la tierra para soportar la producción de cultivos. Además, se destaca que, durante las últimas cuatro décadas el 30% de las tierras cultivables del mundo se han vuelto improductivas debido a la erosión del suelo; además la erosión del suelo no solo está impactando la producción de alimentos; también tiene efectos perjudiciales en la biodiversidad y la salud general del ecosistema (Pimentel, 2006).

3.2.7 Carbono orgánico y servicios ecosistémicos en suelos agrícolas

El papel fundamental del carbono orgánico y su estrecha relación con los servicios ecosistémicos emergen como elementos cruciales para la sostenibilidad ambiental y la productividad agrícola. La comprensión de cómo las prácticas agrícolas afectan el contenido de carbono orgánico se convierte en pilar esencial para abordar desafíos específicos; la diversidad de suelos agrícolas influenciada por factores climáticos y prácticas agrícolas, subraya la necesidad de estrategias de manejo adaptadas a características particulares; las prácticas comunes, como el riego y sembrado impactan en el contenido de carbono orgánico y también influyen en la capacidad del suelo para proporcionar servicios ecosistémicos clave, como la retención de agua y nutrientes; la gestión de la biomasa residual revelan opciones innovadoras para el uso eficiente de los recursos agrícolas, contribuyendo a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y promoción de servicios ecosistémicos. La regulación de servicios ecosistémicos, como el control de gases de efecto invernadero, se convierte en componente esencial para enfrentar los desafíos climáticos. Estrategias como la conservación del agua y la reducción de las malas prácticas agrícolas demuestran ser cruciales para mantener el equilibrio del carbono orgánico en el suelo y a la salud general del ecosistema (Francaviglia et al., 2018).

3.2.8 Cambio de cobertura vegetal

La acción antropogénica en los últimos años va aumentando por la demanda de alimentos, lo cual causa pérdida de la cobertura vegetal que es uno de los factores deslumbrantes a nivel continental, ocasionando déficit hídrica, salinidad del suelo, carencia en la productividad primaria y afectando en su potencial de infiltración de agua a los acuíferos (Damgaard, 2014).

3.2.9 Productividad primaria aérea

Es un indicador de los ecosistemas (pastizales, gramínea y entre otros), que constituye la fijación de carbono en la vegetación que viene siendo afectado directamente por el pastoreo. Asimismo, se refiere a la cantidad de biomasa vegetal aérea que representa la demanda de forraje y busca un mejor manejo sustentable de la cobertura vegetal (Caruso, 2019).

3.3 Definición de términos

3.3.1 Precipitación

Son consideradas partículas de agua líquida y sólida, que provienen de nubes y hacen contacto con la superficie del suelo. Es la relación principal del ciclo de agua que proporciona el suministro hídrico a la superficie de la tierra, que dependen de la temperatura que presenta la atmósfera (Calle & Vargas, 2019).

3.3.2 Densidad aparente

Se establece como la masa de la tierra por unidad de volumen: “Es una forma de evaluar la resistencia del suelo y fertilización. La densidad aparente depende de la textura del suelo y el contenido de materia orgánica; pueden variar estacionalmente por efectos de cultivos” (Rojas & Peña, 2012, pág. 1).

3.3.3 Materia orgánica

Tiene un impacto muy importante en la agricultura, generando un rendimiento mayor en aéreas de cultivos. La materia orgánica del suelo tiene un 5% de contenido de nitrógeno, y el nivel apto de materia en los suelos arcillosos es del 2% decayendo a 1.65% en suelos pesados, todo ello va en relación al tipo del suelo (Julca et al., 2006).

3.3.4 Carbono orgánico

El contenido de carbono en lotes de agricultura ha disminuido en los 100 años recientes (Lal, 2004), estudios realizados muestran la pérdida de CO conlleva a la degradación de la estructura del suelo y capacidad de infiltración, estas acciones trae como efecto la infertilidad del suelo (Teague & Kreuter, 2020), por ello almacenamiento de carbono es de suma importancia, ya que contribuye en los diversos procesos ecológicos (López & Pardo, 2011).

3.3.5 Sobrepastoreo

La capacidad de ganaderia extensiva es uno de los factores que genera la degradación del suelo (Borrelli et al., 2017), debido a una mayor carga animal por unidad de área, afectando campos de agricultura y áreas naturales protegidas, de forma que los ganados generan compactación del suelo, ocasionando suelos desnudos y ramoneo en zonas altoandinas (Charaja, 2008).

3.3.6 Pastizal

Los pastizales altoandinos vienen siendo afectados por el cambio climático y eventos extremos de precipitación y sequía no habituales. Los pastizales proporciona forraje a los animales en un 80%, asimismo almacena carbono, favorece la disponibilidad hídrica, reduce la pérdida de degradación del suelo mejorando la producción de forraje y estabilidad del suelo, en consecuencia mejora la producción ganadera (Flores, 2016).

3.3.7 Agricultura

Son acciones de cultivo, que consiste en labrar la capa superficial del terreno, mediante la acción del ser humano para cultivar diversos productos con la finalidad de satisfacer las necesidades básicas de un hogar y copar la demanda del mercado, mediante usos convencionales o tecnológicos, así mejorando la calidad de vida de las personas (Leiva, 2014).

3.3.8 Georreferenciación

Consiste en señalar una posición de un individuo representativo en una cuenca para un estudio, mediante sistemas de coordenadas. La georreferenciación es de suma importancia para localizar un elemento, delimitar una cuenca, entre otros, suele utilizarse en el sistema de información geográfica (Reyna y Gossweiler, 2011).

3.3.9 Imagen satelital

Es una observación visual de una información que es obtenida por un sensor adaptado a un satélite, que proporcionan información de la tierra. Hoy en la actualidad estudios realizados con imágenes satelitales son de suma importancia en diversas áreas, contribuyendo en la agricultura, cuencas hidrográficas, ordenamiento territorial, entre otros (Reyna y Gossweiler, 2011).

3.3.10 Landsat

Es un servidor que proporciona imágenes satelitales, que sirven para analizar la pérdida de la cubierta vegetal y boscosa a lo largo del tiempo, a través de análisis de mapas que son procesados en el sistema de información geográfica (SIG), lo mencionado contribuye en diversos tipos de análisis espacial (Reyna y Gossweiler, 2011).

3.3.11 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El índice de vegetación de diferencia normalizada se emplea para estimar la abundancia, calidad y aumento de la cobertura vegetal, por medio de cálculo de la intensidad de radiación del espectro electromagnético que emite la planta, se toma en consideración la banda roja e infrarroja correspondientes a cada satélite para su cálculo respectivo (Carbajal & Onofre, 2020).

IV METODOLOGÍA

4.1 Tipo y nivel de investigación

El trabajo de investigación es no experimental de tipo básica, ya que consiste en utilizar el método científico, a fines que son utilizados de forma teórica (Bunge, 1985). Se describen situaciones concretas como: carbono orgánico del suelo, productividad, pendiente, altitud, NDVI, agricultura, pastizal y entre otros, con la finalidad de buscar posibles soluciones ante un problema. Se optó la investigación básica, con el objetivo de incrementar conocimientos científicos de la variación del COS en un escenario.

El trabajo de investigación es cuantitativo de nivel descriptivo (Rolando et al., 2017), donde se explica su particularidad de las características de la población que influyen en el cambio en el uso del suelo, impactos del cambio climático y actividades agrícolas. Se recopilarán datos al evaluar la productividad y carbono orgánico del suelo de sistemas altoandinos.

4.2 Ámbito temporal y espacial

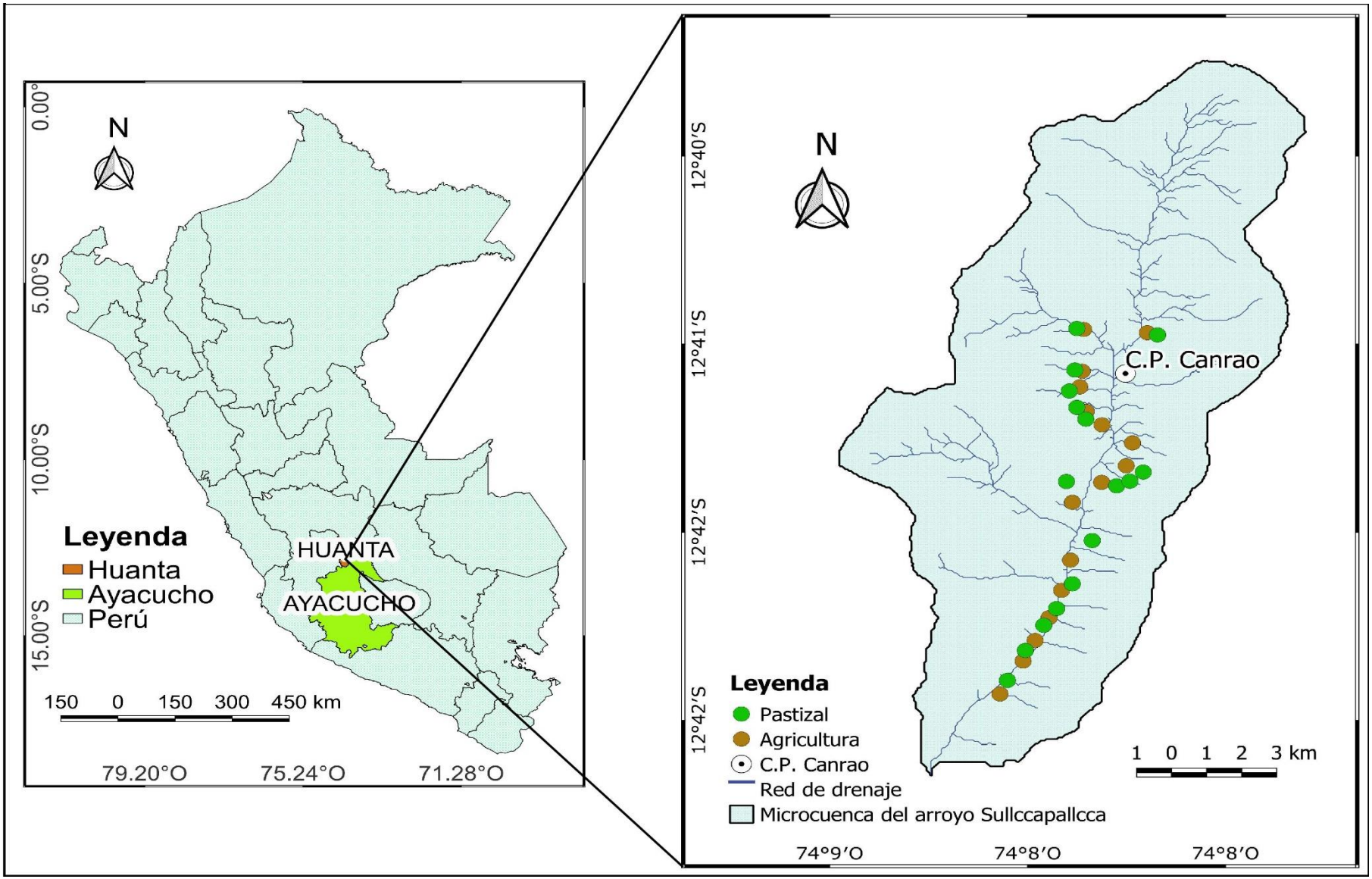
El presente trabajo de investigación cronológicamente duro 7 meses, iniciando el mes de junio del 2022 y finalizando el mes de diciembre del mismo año. El estudio de investigación queda ubicado en la microcuenca del arroyo Sullccapallcca en el centro poblado de Canrao, distrito Sivia, provincia Huanta y departamento Ayacucho, siendo particular por sus ecosistemas altoandinos y condiciones climáticas, cuenta con una superficie de área de 211.38 Km^2 en las coordenadas: latitud -12,6813264, longitud -74,1331684, y una altitud promedio de 3929 m.s.n.m. (Instituto Nacional de Estadística e informática - INEI, 2018). El área de estudio limita por el noroeste con el río Putis y Huallhuayocc, por el este con el Centro Poblado de Rosario Acón y por el sur con el Centro Poblado de Tircus (Municipalidad Provincial de Huanta, 2013).

La fuente de ingreso económico de la localidad de Canrao es la venta de carne de ganado y agricultura, que sustentan el gasto de hogar. El acceso vial a la localidad es de trocha carrozable en pésimas condiciones. En las partes más bajas de la microcuenca prevalece la agricultura y la vegetación de los pastizales como: *Stipa ichu, Carex sp, Calamagrostis rigescens, Stipa brachyphylla, Hipochaeris taraxacoides, Scirpus rigidus* y entre otros. En las partes más altas, predominan las áreas de suelo desnudo con afloramientos rocosos, favorecidas por las altas pendientes que generan escurrimiento pluvial. Los pobladores practican la quema anual para eliminar los pastizales, arbustos y hierbas viejas con el objetivo de facilitar nuevos rebrotes que beneficien al ganado (vacuno, ovino, caprino y porcino) (Sylvester et al., 2017). El sistema de pastoreo que se practica en el área de estudio es de manera continua, por la limitación de relieve del terreno, de igual modo la agricultura se práctica de manera convencional, por la dificultad de acceso y las fuertes pendientes del terreno, que limita la entrada de maquinarias agrícolas. Las especies que se cultivan son de manera anual como el *Solanum tuberosum*, *Oxalis tuberosa, Tropaeolum tuberosum, Triticum aestivum, Hordeum vulgare, Lepidium meyenii,* entre otros. Generalmente se fertilizan los cultivos con fertilizantes orgánicos como: estiércol de ganado y guano de isla, siendo limitado, debido a la economía del agricultor.

El clima del área de estudio se considera semiseco, y la precipitación media anual es de 850 mm y varía entre 500 y 1200 mm en el periodo (1981 – 2010), según los registros del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). La temperatura media anual es de 8°C, mientras que la temperatura media del mes más frio es de 0°C (julio) y 14°C del mes más cálido (diciembre).

Figura 1

Localización del área de estudio y puntos determinados para el muestreo de suelo



4.3 Población y muestra

a. Población

Entre tantas definiciones existente respecto a población en el contexto de la investigación científica, una de ellas es la que sostienen Moisés et al, (2019) "Conjunto total de elementos (personas, familias, viviendas, objetos, etc.) que comparten al menos una propiedad en comun, circunscritos en un espacio y tiempo definido; es decir dónde y cuándo". Sin embargo, para las características peculiares del presente estudio, esta definición no engloba plenamente; consecuentemente, se da un sentido equivalente a la población de estudio a la extensión territorial de la microcuenca del arroyo Sullccapallcca, que comprende la superficie de área de 211.38 Km^2.

b. Muestra

En el mismo sentido de la fundamentación expuesta en la definición de la población de estudio, para determinar la muestra se ha recurrido a la investigación de Somovilla et al., (2019) científico de la Universidad Nacional de San Luis de Argentina; lo cual, ha permitido establecer como muestra de estudio 16 puntos de muestreo pareados por parcelas de áreas de suelos agrícola y de pastizal, distanciados a 50 metros como máximo.

4.4 Instrumentos

Tabla 2

Materiales y equipos

MATERIALES E INSUMOS	EQUIPOS
Calador de suelo recto	GPS
Plato de evaporación de PTFE	Laptop
Anillos para muestreo	Computadora Workstation
Tamiz	Balanza analítica
Pinzas	Balanza digital
Espátula	Estufa
Pico de mano	Mufla
Utensilio para corte	Bolsa de dormir
Comba de 2 Kg	Plato metálico
Pala recta para muestreo	Bolsa ziploc con cierre
Etiqueta	Maso de madera
Papel Bond	Guantes super flex
Lapicero	Mochila de senderismo
Cuaderno de campo	Botas de montaña de media caña
Lápiz indeleble	

4.5 Procedimientos

La secuencia investigativa del presente estudio, materia de tesis, se ha desarrollado en tres etapas fundamentales, las mismas que se detallan a continuación:

a. Trabajo de campo

El presente trabajo de investigación se realizó in situ para el muestreo de suelo en la microcuenca del arroyo Sullccapallcca ubicado en el centro poblado de Canrao, Distrito Sivia.

Para facilitar el trabajo de campo, los puntos de muestreo fueron en cercanías del arroyo Sullccapallcca. Para seleccionar el número de puntos a muestrear, en primer lugar, se analizó las imágenes históricas de Google Earth de la microcuenca para identificar los puntos de muestreo en áreas de cultivos y pastizales. Estos puntos de muestreo fueron sugeridos por un experto de la Universidad Nacional de San Luis (Argentina). Finalmente, se establecieron 16 puntos pareados conformados por parcelas de cultivo y pastizal, siendo lo más representativo para el área de estudio. La distancia entre ambos lotes fue siempre inferior a 50 m entre los puntos P1 (agricultura) y P1 (pastizal), sucesivamente hasta el punto 16, con la finalidad de garantizar las condiciones ambientales similares en ambos lotes (por ejemplo: pendiente y elevación), para mayor detalle ver anexo: figura 7 y 8. Los sitios agrícolas se han mantenido en dicha condición al menos durante los últimos 35 años. De cada punto muestreado se registró la posición geográfica y la altitud con un GPS.

Para determinar la materia orgánica, carbono orgánico del suelo y stock de COS se realizó la recolección de submuestras inalteradas con un calador de suelo recto en 16 puntos de la microcuenca para zonas agrícolas, de igual modo se hizo el mismo procedimiento para zonas con pastizal, en su totalidad se recolectaron 32 submuestras de suelo de ambos lotes en un horizonte de 0 - 20 cm de profundidad del suelo, que posteriormente fueron debidamente rotuladas.

Para el muestreo de densidad aparente del suelo se realizó con un anillo de acero de 5.08 cm de diámetro y volumen de 202.68 cm^3, con la finalidad de obtener muestras de suelo inalteradas de 16 puntos dispersos por la microcuenca para zonas agrícolas y 16 puntos para zonas con pastizal, las muestras recolectadas fueron debidamente rotuladas para su traslado correspondiente.

b. Trabajo de laboratorio

Para determinar la materia orgánica del suelo consistió en secar las muestras obtenidas del campo en una estufa a 105° C por 24 horas, con la finalidad de homogenizar la humedad de las muestras, posteriormente fueron tamizadas en malla de 0.85 mm, se determinó el peso seco de la muestra en un balanza analítica para su calcinación en una mufla a 360° C por 2:30 horas, posteriormente fueron puestas en un desecador y finalmente se registró el peso calcinado en una balanza analítica de precisión para su cálculo correspondiente mediante el método de calcinación (Schulte & Hopkins, 1996).

Formula:

$$\%MO = \big((peso\ 105°C - peso\ 360°C) * 100\big) \div peso\ 105°C$$

La determinación de carbono orgánico del suelo se calculó mediante el factor de conversión 0.58 propuesto por (Van, 1890) a partir de la materia orgánica del suelo

Formula:

$$\%COS = \%MO(0.58)$$

Finalmente, el contenido de stock de carbono almacenado en un horizonte de 0 - 20 cm del suelo se calculó a partir de la densidad aparente del suelo, profundidad del suelo y carbono orgánico del suelo (Malki et al., 2022).

Formula:

$$Stock\ C\ (Tn.ha^{-1}) = Densidad\ aparente * Profundidad\ del\ suelo * COS$$

Finalmente, para determinar la densidad aparente del suelo se puso a secar las submuestras recolectadas del campo en una estufa a 105° C por 24 horas, con la finalidad de homogenizar la humedad de las muestras, se registró el peso seco mediante una balanza analítica para su cálculo correspondiente mediante el método del cilindro propuesto por (Blake, G. R. and Hartge, K. H. 1986).

Formula:

$$Da = \frac{Mss\ (g)}{V\ (cm^3)}$$

c. Trabajo de gabinete

- **Delimitación de la microcuenca**

Se delimitó la microcuenca en un modelo digital de elevación proporcionado del satélite ALOS PALSAR que cuenta con una resolución espacial de 12.5 m por pixel (https://asf.alaska.edu); posteriormente, para corregir las depresiones del ráster, se realizó el pre procesamiento del DEM haciendo uso el software libre Qgis 3.16.1, seguidamente se creó una capa de acumulación y direcciones con el algoritmo r.watershed, finalmente se delimitó la microcuenca y la red de drenaje (Kinner et al., 2005), así mismo se extrajo dato de variable topográfica (pendiente) con un vector de puntos mediante el complemento analysis point sampling tool, con la finalidad de ver la relación entre almacenamiento de COS de ambos lotes (agricultura y pastizal) con la pendiente del terreno.

- **Puntos de muestreo**

  La identificación de puntos muestreados se realizó mediante imágenes cronológicos en el software Google Earth Pro, con la finalidad de ver el cambio dinámico temporal del terreno e identificar zonas agrícolas y pastizales de la microcuenca, al igual fueron corroborados in situ, con la finalidad de obtener muestras de suelo inalteradas y productividad primaria aérea a partir del NDVI.

- **productividad primaria de biomasa vegetal**

  Para la determinación de la productividad primaria de biomasa vegetal a través del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), se recurrió al uso de las imágenes obtenidas a partir del satélite Landsat 8 que vienen obteniendo información del año 2013 a la actualidad; para lo cual, se consideró el periodo de evaluación un intervalo de 9 años comprendido entre el año 2013 y 2021, cuya resolución espacial es de 30 m por pixel y cada adquisición de imagen es de 16 días (Carbajal & Onofre, 2020).

  Finalmente, las imágenes fueron procesadas en el software Qgis 3.16.1 mediante la calculadora raster, los valores de NDVI para los puntos de zonas agrícolas y pastizales se extrajeron con un vector de puntos mediante el complemento *analyses point sampling toll*.

4.6 Análisis de datos

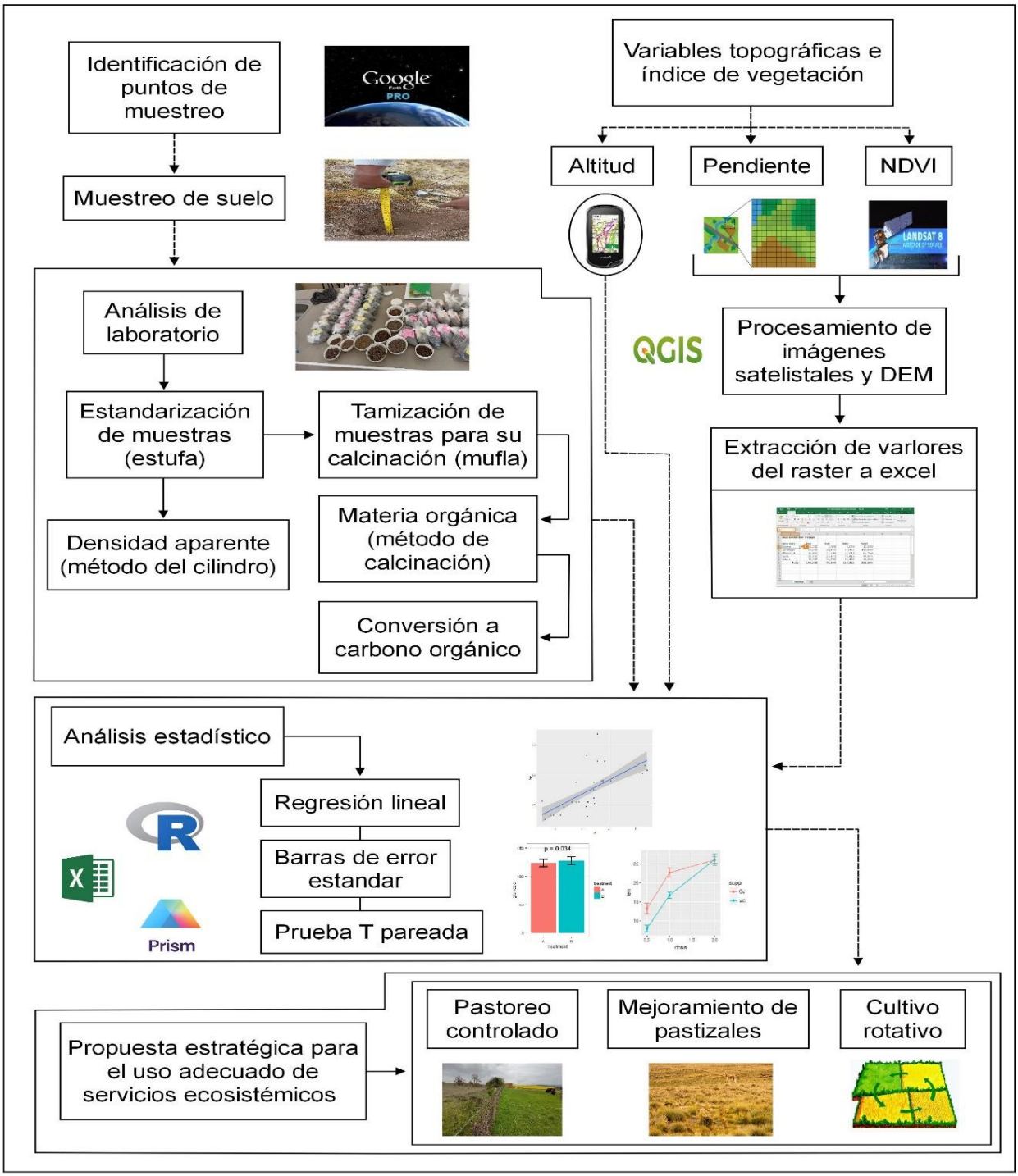
Los datos recopilados de campo (altitud), datos de laboratorio (COS, densidad aparente y stock de COS), finalmente datos de gabinete (NDVI y pendiente), fueron ordenados en una hoja de Excel. Los análisis estadísticos realizados para los datos obtenidos a partir de la investigación fueron la prueba T de Student para comparar las medias de dos grupos y ver el nivel de

significancia, los resultados fueron representados gráficamente en barras de error estándar que indican la incertidumbre y de cuan precisa es la medición y gráfico de dispersión con línea 1:1. Asimismo, se realizó la regresión lineal para ver la relación entre dos variables.

Para llevar a cabo los análisis estadísticos se tomó en cuenta el software estadístico GraphPad Prism y R Project. Por otro lado, se utilizó el software Qgis como procesamiento de las imágenes satelitales para calcular el NDVI.

Figura 2

Metodología para la evaluación de productividad y carbono orgánico del suelo



V RESULTADOS Y DISCUSIÓN

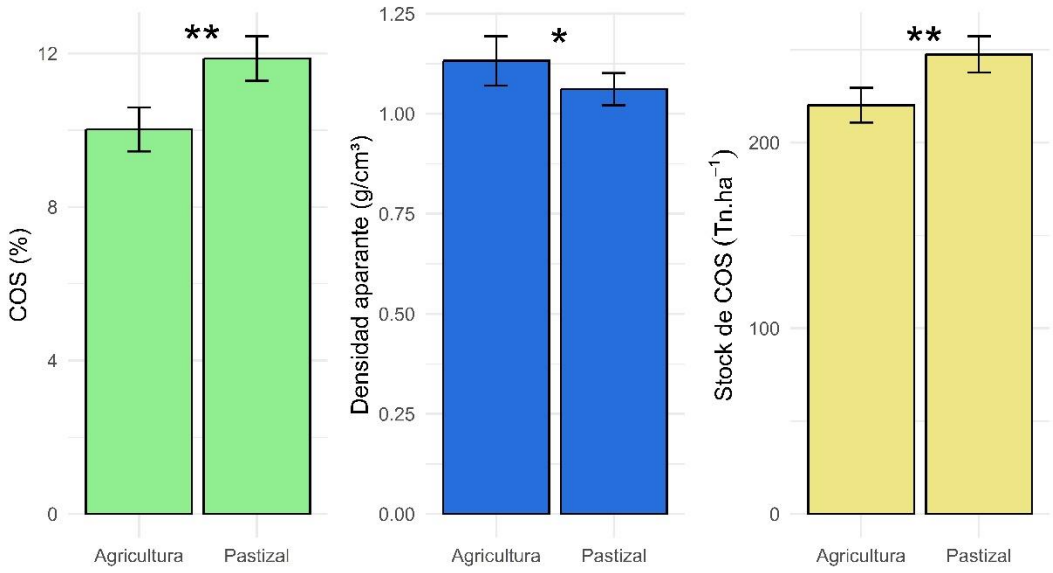
5.1 RESULTADOS

5.1.1 Determinación de cambios del carbono orgánico en suelo agrícola y pastizal en función a las propiedades edáficas del suelo

El contenido de carbono orgánico del suelo (COS) en un horizonte de 0 - 20 cm de la capa superficial en lotes de agricultura y pastizal varia por la gradiente altitudinal, acciones antropogénicas y en particular por las características del suelo, asimismo se ve afectado por la pendiente topográfica favoreciendo que la escorrentía pluvial transporte sedimentos generando pérdida de carbono edáfico. Por ello las barras de error muestran la variabilidad de los datos y el error estándar en una medición. Cabe aclarar el análisis estadístico tomado es la prueba t de Student con la finalidad de comparar las medias de dos grupos (pastizal y suelo agrícola) y ver el nivel de significancia representados gráficamente en barras de error estándar, asimismo el coeficiente de determinación (R^2) busca estadísticamente explicar cómo una variable x (NDVI, altitud y pendiente) influye a la variable y (COS, densidad aparente y stock de COS) de igual modo representa la medida de precisión de un modelo.

Figura 3

Barras de error estándar de (COS, Da y Stock de COS)



Nota. Valores medios y barras de error para (COS), (Da) y (Stock de COS) en áreas de pastizal y agrícolas. Las diferencias significativas inciden un * ($P > 0.05$) y ** ($P < 0.05$).

La Fig. 3 muestra el análisis estadístico realizado para el carbono orgánico del suelo en lotes agrícolas y pastizales, registrando diferencias significativas ($P < 0.05$ ** - $R^2 = 0.32$) donde las zonas con pastizal registran mayor contenido de COS con una media de 11.87% a una diferencia de 1.85% más respecto a zonas con agricultura que acogen una media de 10.02%. Las áreas de pastizal contienen mayor COS, debido a hojarascas, raíces finas y *Stipa Ichu* que se descomponen en un tiempo menor, favoreciendo el aumento significativo en un margen de 0 - 20 cm del suelo (Rivera & Zamora, 2019). Por otra parte, la densidad aparente del suelo no mostró diferencias significativas ($P > 0.05$ * - $R^2 = 0.07$) resultando que las zonas con agricultura registraron mayor concentración de Da con una media 1.13 g/m^3 a una diferencia de 0.07 g/m^3 superior respecto a las zonas con pastizal registrándose una media de 1.06 g/m^3 debido en gran medida a una mayor carga animal por unidad de área (sobrepastoreo)

y el laboreo (Charaja, 2008). Finalmente, en el Stock de carbono orgánico del suelo se apreció diferencias significativas ($P < 0.05$ ** - $R^2 = 0.2$) obteniendo mayor contenido de reserva las zonas de pastizal con una media de 247.49 $Tn.ha^{-1}$ a una diferencia de 27.34 $Tn.ha^{1}$ más que las zonas con agricultura que almacenan una media de 220.15 toneladas de carbono por hectárea.

Tabla 3

Análisis estadístico de prueba t de Student

	Prueba t pareada	Diferencias			
Variables	P value	Media	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	R^2
Carbono orgánico (%)	0.0174	1.846	0.69	0.37 a 3.319	0.32
Densidad aparente (mg/cm^3)	0.2942	-0.07	0.065	-0.209 a 0.068	0.07
Stock de C ($Tn.ha^{-1}$)	0.0485	-27.34	12.73	-54.47 a -0.2052	0.24

La Tabla 3 muestra los valores obtenidos al realizar el análisis estadístico de Prueba t Student pareada en lotes de agricultura y pastizal. El almacenamiento de COS mostró diferencias significativas $p = 0.0174$ ($p < 0.05$), esto se debe a que surge una mayor variabilidad de datos en ambos lotes de estudio. Por otra parte, la densidad aparente del suelo no mostró diferencias significativas $p = 0.2942$ ($p > 0.05$), debido a que no se dio tanta variabilidad de datos en ambos lotes. Finalmente, el stock de COS al realizar el análisis estadístico muestra una diferencia significativa $p = 0.0485$ ($p < 0.05$). Por lo tanto, ambos lotes de estudio no tienen

mayor variación de datos para la densidad aparente. Sin embargo, para el COS, Stock de COS muestran mayor variabilidad.

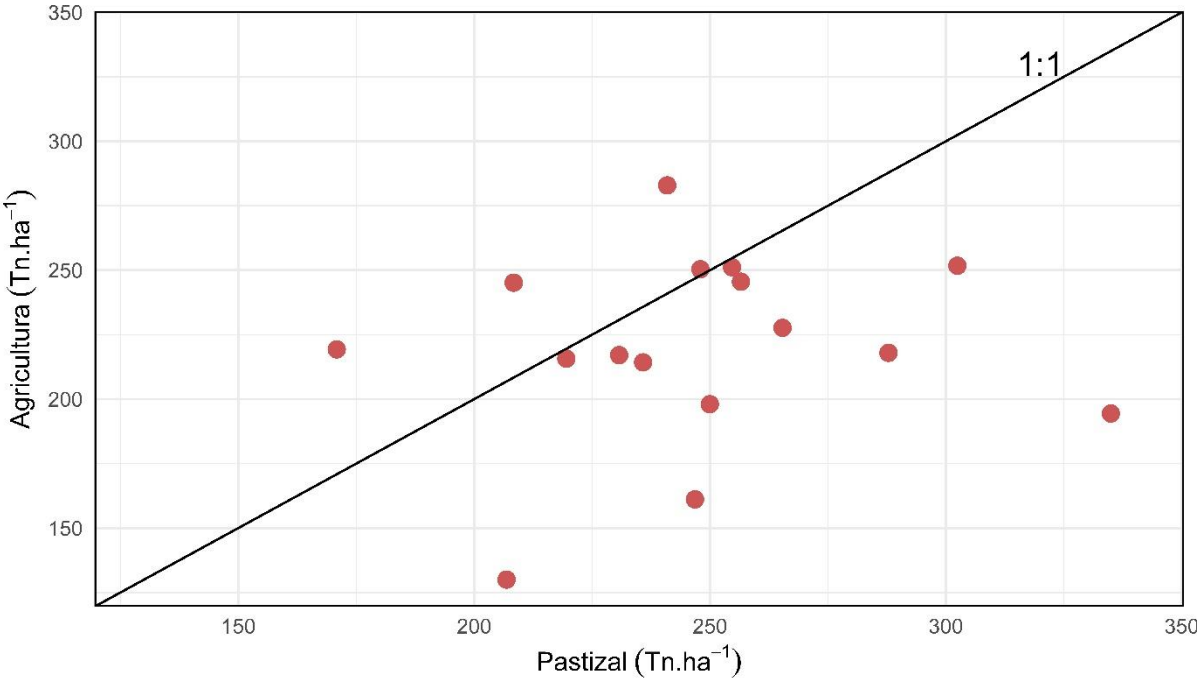
El presente estudio muestra que en las zonas agrícolas disminuye el contenido de COS, debido en parte a la práctica de cultivos se tiende a eliminar la cobertura vegetal ocasionando mayores pérdidas de C (Borrelli et al., 2017) que trae como efecto negativo la pérdida de nutrientes. Por otro lado, los restos del *Stipa Ichu* y hojarascas producen un aumento significativo en la reserva de COS en zonas de pastizal (Rivera & Zamora, 2019). Asimismo, el aumento de COS se debe cuando las pasturas reemplazan a los cultivos agrícolas, registrándose mayor almacenamiento de C en un horizonte de un metro (Guo & Gifford, 2002). El análisis del momento es relevante para ver el contenido de COS actual, ya que la hojarasca y raíces finas se descomponen en un periodo menor (Lei et al., 2019).

Stock de carbono orgánico del suelo

El contenido de reserva de COS en un horizonte de 0 - 20 cm depende de las características edáficas, condiciones climáticas, tipo de agricultura y el sobrepastoreo que pueden generar un impacto negativo en el almacenamiento de Stock C.

Figura 4

Variación de la reserva de Stock de COS



Nota. Variación del Stock de COS en lotes de pastizal y agricultura. Línea oblicua que intercepta ambos ejes, representada por una línea 1:1.

Al analizar los pares de forma individual se registraron mayor contenido de Stock C en zonas de pastizal (la Fig. 4), donde se observa que las concentraciones de COS se dieron en su mayoría en los pastizales al combinar las métricas de stock de COS de ambos lotes, en excepción de cuatro puntos que se debe por factores externos. El punto registrado por encima de la línea 1:1 significa que en la zona de agricultura se registró mayor contenido de COS diferente a lo resto de datos. La prueba t pareada para el stock de carbono muestra diferencias significativas ($P < 0.05$ ** y $R^2 = 0.2$) registrándose mayor contenido de COS en las zonas de pastizal en promedio 247.49 Tn.ha^{-1} donde los datos varían entre 170.87 – 334.99 Tn.ha^{-1} con una diferencia de 27.34 Tn.ha^{-1} más que las zonas con agricultura que almacenan en promedio 220.15 Tn.ha^{-1} donde los datos fluctúan entre 130 – 282.91 Tn.ha^{-1}.

Los cambios en las reservas de COS fue ligeramente superior en suelos de pastizal, esto podría atribuirse a un mayor aporte de la descomposición de material orgánico en la capa superior, que es el principal aporte del COS, es decir la descomposición del material vegetativo fue relativamente menor en suelos de tipo agrícola, debido a la disminución de la descomposición vegetativa por parte del pastoreo y agricultura (Shiferaw et al., 2019). Por otra parte, el COS disminuye en relación a la profundidad del suelo, en gran medida a una mayor compactación del suelo, debido al peso de las capas superiores (Shapkota & Kafle, 2021).

5.1.2 Determinación de cambio en la productividad primaria de biomasa vegetal en suelo agrícola y pastizal en términos índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

El NDVI es un indicador de la productividad primaria aérea (Jobbágy et al., 2002), consiste en cuantificar la cobertura de la superficie terrestre mediante imágenes satelitales, identificando los cambios de uso del suelo y la dinámica temporal de las áreas de vegetación en la microcuenca del arroyo Sullccapallcca (Taufik et al., 2016).

Figura 5

Valores medios y error estándar

Nota. Dinámica estacional (A) e interanual (B) de NDVI en lotes agrícolas y pastizal. Se muestran valor medio y error estándar para ambas figuras.

La media del NDVI para ambos gráficos fueron superior en lotes de agricultura respecto a zonas de pastizal, el promedio de NDVI en la agricultura fue 4% superior a zonas de pastizal (Fig. 5 – A) y 3% más en zonas agrícolas respecto a lotes de pastizal (Fig. 5 – B). Los meses con mayor de NDVI se registró en los 3 primeros meses del año, debido que en la zona de estudio en dichos meses se da mayor precipitación, favoreciendo el aumento de NDVI. Los últimos años de evaluación los valores de NDVI tienden a registrar un crecimiento leve para ambos lotes de estudio y alejarse de uno al otro. El análisis de t realizado para las zonas pareadas mostró diferencias significativas ($P < 0.05$ ** y $R^2 = 0.396$). Por otro lado, para ambas figuras se observan un mínimo error estándar debido a que la distribución de medias de la

muestra es menos dispersa constituyendo mejor estimación en la media de la población. Los valores de NDVI del área de estudio muestra un aumento leve al pasar los años como en la Fig. 5 B. Es interesante notar que en el último año tiende a un incremento de NDVI para ambos lotes de estudio, es por ello que un estudio prospero a largo plazo sería ideal para abordar a más detalle la dinámica temporal del NDVI.

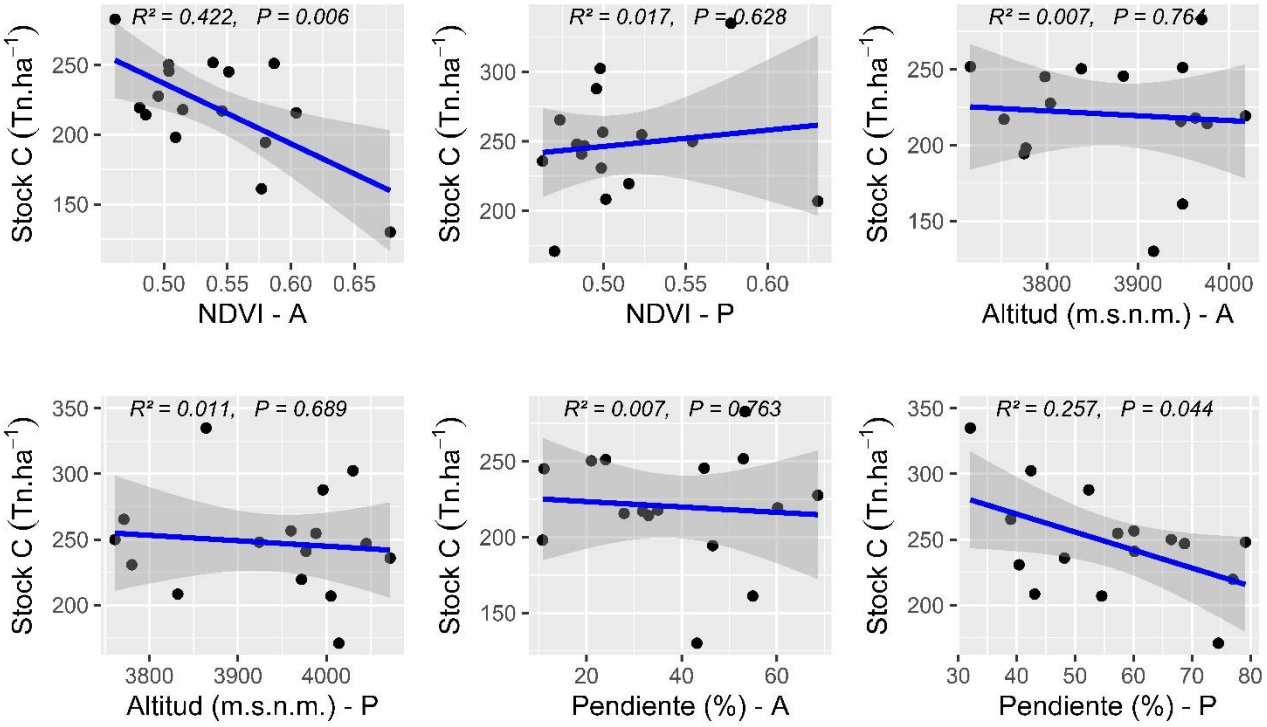
Regresión lineal para Stock de COS en relación a variables ambientales

Se realizó el análisis estadístico para el Stock de carbono orgánico del suelo en función a los variables ambientales, con el objetivo de visualizar cierta relación con la variable independiente, si las variables ambientales influyen en el almacenamiento de COS en ambos lotes evaluados a una profundidad de 0 - 20 cm del suelo.

Se tomó la regresión lineal con la finalidad de visualizar si existe una relación de la variable Stock de COS de ambos lotes de estudio con las variables ambientales y ver si intervienen o no en el almacenamiento de carbono edáfico.

Figura 6

Regresión de variables ambientales con stock C



Nota. Regresión para Stock de COS para zonas con agricultura (A) y pastizal (P) en función a variables ambientales. Obteniendo valores de R^2 – P.

El contenido de stock de COS en sistemas altoandinos para ambos lotes, muestran baja relación en función a las variables ambientales (pendiente, altitud y NDVI), en el sentido que los puntos no se ajustan a la línea de tendencia y muestran un R^2 inferior, debido a que intervienen otros factores externos. De igual modo, en gran parte no se apreció diferencias significativas ($P > 0.05$), exceptos dos regresiones (NDVI – A y Pendiente – P) donde muestran diferencias significativas.

La regresión lineal del stock de COS en relación a variables ambientales estuvo parcialmente asociada al NDVI, altitud y pendiente del terreno, donde mostraron baja correlación para ambos lotes de estudio (agricultura - pastizal), excepto en dos casos. El estudio relacional en las zonas agrícolas registra baja relación lineal y significativo, debido a que no

se ajustan a la línea de tendencia, entre las variables ambientales y el stock de COS registrando valores de (R^2 = 0.007, 0.007) y (P = 0.764, 0.763) (Fig. 5), para la altitud y pendiente en relación al stock de COS esto se debe a que los datos de stock de COS es muy variable en los puntos de muestreo por la gradiente altitudinal y la pendiente topográfica que no muestran cierta relación con el almacenamiento de carbono orgánico del suelo, excepto al NDVI que muestra una relación ligeramente buena y significativo (R^2 = 0.42 – P < 0.05), debido que a mayor NDVI disminuye relativamente el stock de COS. Asimismo, en los suelos con pastizal muestra baja correlación y significativo entre las variables ambientales y el stock de C obteniendo valores de (R^2 = 0.017, 0.011) y (P = 0.628, 0.689) (Fig. 5) para el NDVI y altitud respecto al stock de COS en gran medida se debe a que los datos de stock de COS es muy variable en cada punto de muestreo por el NDVI y altitud, por ende, no muestran cierta relación con el almacenamiento de carbono orgánico del suelo, a excepción de la pendiente que muestra diferencias significativas P < 0.05 y un R^2 = 0.257, en este caso se observó que a medida aumente la pendiente del terreno disminuye significativamente el stock de COS. Esta disminución del stock de COS observada en las praderas con pendiente podría deberse a su efecto sobre el movimiento superficial y la acumulación de agua. El análisis estadístico muestra baja relación debido, a que pueden intervenir otros factores como la condición climática, propiedades del suelo y acciones antropogénicas.

5.1.3 Estrategias para el manejo adecuado de ecosistemas altoandinos en la microcuenca del arroyo Sullccapallcca.

Por la importancia que reviste la sostenibilidad de la generación permanente del carbono orgánico del suelo y la productividad primaria de la biomasa vegetal en suelos de vocación agrícola y de pastizal en el contexto territorial de la microcuenca Sullccapallcca que

viene a ser ámbito específico de la investigación realizada, surge la iniciativa de establecer estrategias tecnológicas orientadas a contribuir en la sostenibilidad ecosistémica en las dimensiones del espacio y el tiempo, que ha de constituir un referente para las instancias inherentes a la toma de decisiones en el ámbito local y regional. Además, los conocimientos generados en la investigación constituyan como una especie de base de datos para la formulación de proyectos de inversión dentro de una agenda de desarrollo integral de las comunidades alto andinas. En tal sentido, las estrategias específicas identificadas son:

a. Mejoramiento de sistemas de pastizal

De acuerdo al análisis del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se identificó menor cobertura vegetal en zonas de pastizal debido al pastoreo, ampliación de la frontera agrícola y condiciones climáticas que ocasionan pérdida de cobertura vegetal. Por lo cual, se toma la estrategia de resiembra con las especies nativas del lugar, como el *Stipa Ichu* y arbustos en las áreas impactadas por el pastoreo y el incendio intencional ocasionado por los pobladores de la localidad (Quispe, 2017). La resiembra con especies nativas contrarresta la erosión del suelo y permite menor escorrentía pluvial minimizando el transporte de material edáfico, por ende, tienen un impacto positivo en la reserva de carbono orgánico del suelo, así mejorando la salud del suelo (Alvarado & Zúñiga, 2018).

Se recomienda realizar la resiembra en las áreas afectadas con semilla autóctona mediante el sistema voleo, en el periodo con mayor precipitación que varían en los meses que van de diciembre – febrero, con la finalidad de aumentar la productividad primaria aérea, así aumentando el contenido de COS en una profundidad de 0 - 20 cm. Todo este accionar conlleva que la comunidad altoandina mejore sus sistemas de pastizal en beneficio a la calidad de vida de los pobladores.

b. Pastoreo controlado

Se consideró dicha estrategia por el motivo que el sistema de pastoreo para el sitio de estudio son de forma echaderos por la limitación de relieve topográfico, consecuentemente el sobrepastoreo trae como consecuencia la compactación del suelo, ramoneo y erosión del suelo por una mayor carga animal por unidad de área, afectando en la reserva de carbono orgánico del suelo y la productividad (Borrelli et al., 2017). Por ello, se debe practicar el pastoreo controlado, mediante cercos de manera perimétrica en áreas con mayor productividad de pastizal y menor pendiente topográfico, con la finalidad de limitar su área de extensión de los ovinos y vacunos, así evitando impactos negativos que puedan ocasionar en el ecosistema del suelo e hídrico (Bautista et al., 2022), así mismo se debe practicar el cultivo de forraje en las áreas cercadas, favoreciendo el incremento de la producción de carne y láctea, que traen como beneficio económico a la población.

c. Cultivo rotativo

Se tomó en cuenta la presente estrategia, debido a que se práctica cultivos monótonos en el lugar de estudio. El cultivo rotativo consiste en alternar la agricultura con plantaciones trimestrales o anuales en un área de cultivo, con el objetivo de mantener la fertilidad del suelo, permitiendo contrarrestar la permanencia de enfermedades y plagas. Por otra parte, el cultivo rotativo genera incremento en la producción y mayor rendimiento del suelo, debido a una mayor concentración de COS, nitrógeno, entre otros (Gabbarini et al., 2017). Asimismo, el uso de cultivo rotativo ha demostrado impactos positivos en el almacenamiento de materia orgánica del suelo generando mayor producción agrícola (Espinoza et al., 2007).

Dicha estrategia busca la sostenibilidad de la agricultura por medio del cultivo rotativo, con el objetivo de aumentar su producción agrícola del terreno en beneficio del agricultor.

Las estrategias propuestas tienen como finalidad maximizar la productividad primaria aérea y las reservas de carbono orgánico del suelo en un horizonte de 0 - 20 cm de la superficie del suelo, así mejorando la calidad de vida de los pobladores del Centro Poblado de Canrao.

5.2 DISCUSIÓN

Las diferencias en el stock de COS entre pastizales y agricultura estuvieron fuertemente asociadas. Es decir que sitios con mayor stock de COS generan mayores pérdidas cuando son transformados en agricultura. Este patrón es similar al encontrado en la región pampeana Argentina, donde encontraron que el principal factor ambiental que determina la pérdida de carbono cuando suelos de pastizal son transformados en agricultura (Wyngaard et al., 2022). Esta relación encontrada es relevante ya que permitiría predecir el impacto de futuros cambios en el uso del suelo sobre el stock de CO e identificar estrategias para la planificación del uso del suelo que minimicen las emisiones de C del suelo.

Asimismo, el contenido de stock de COS tras la conversión de pastizales nativos a tierras agrícolas fue en promedio ligeramente mayor en zonas de pastizal que en suelos bajo cultivo, similar a un estudio realizado en las periferias de Popondetta que encontraron mayor COS en lotes de pastizal en un horizonte de 1.5 m (Goodrick et al., 2015). Asimismo, corrobora Zhao et al., (2017) que las reservas de COS fue superior en pastizales hasta en un 79% que en tierras de cultivo en una profundidad de 0 – 60 cm. Por otra parte, la agricultura en áreas de pastizal conlleva a disminuir las reservas de COS en un 69% en un margen superficial de 0 – 10 cm (Shiferaw et al., 2019), de igual modo un estudio reciente muestra como la conversión de pastizal a agricultura genera pérdidas de stock de COS en promedio 13, 26 y 5 Tn C ha^{-1} en

suelos de textura gruesa, media y fina (Liang et al., 2023). De igual modo, en la región pampeana Argentina, el reemplazo de pastizales nativos por cultivos anuales disminuyó el COS entre un 25 y 35% en los primeros 20 cm del suelo (Wyngaard et al., 2022). En general, numerosos estudios muestran caídas de entre el 30 y 80% cuando pastizales son convertidos en tierras agrícolas (Guo and Gifford, 2002). En este sentido, la conversión de suelos bajo pastizal a cultivo, genera en cierta parte la disminución en las reservas de COS, debido la remoción del suelo, afectando en la estructura edáfica (Lal, 2004). Asimismo, está sujeto a la variación climática, tipo de suelo y cobertura vegetal. Un estudio realizado por Mukumbuta & Hatano, (2020) concluyen que sin la adición de estiércol y sin la retención de residuos en el suelo no aumenta el COS en áreas agrícolas.

Otro aspecto a discutir es la cantidad de carbono almacenado en los suelos de los pastizales estudiados son relativamente altos en comparación con otros sitios de pastizales. Por ejemplo, una revisión global con más de 120 sitios mostró que los pastizales templados acumulan en promedio 117 tn C /ha (Jobbagy & Jackson, 2000) en el primer metro del perfil del suelo. Asimismo, en pastizales de altura de Francia, el promedio de COS almacenado en los primeros 20 cm del suelo fue de 90 tn C/ha (Soussana et al., 2004). Por otro lado, trabajos realizados en la región de estudio también muestran valores de concentración de materia orgánica similar a los obtenidos en este trabajo (Aguilar, 2019). Esto podría atribuirse, a la gran altitud del sitio de estudio (> 3500 m.s.n.m.), lo que determina una baja temperatura del aire, podría explicar los altos niveles de stock de COS observados en los sitios estudiados. Por otro lado, la baja temperatura limitaría la actividad microbiana (Wiesmeier et al., 2019), y por lo tanto las tasas de descomposición de la materia orgánica, favorecería la acumulación de los altos niveles de COS observados en este trabajo.

Asimismo, otro hallazgo es la variación del contenido de stock de C en ambos lotes de estudio, se debe en gran medida por condiciones ambientales. Estudios relacionados muestran que las reservas de COS varían por factores ambientales como altitud, pendiente y uso del suelo (Gutiérrez et al., 2015). Asimismo, la cobertura vegetal incide en las reservas de C mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada y biomasa aérea que son características propias que interviene en cierta parte en el contenido de COS (Merabtene et al., 2021). Estudio realizado por Shedayi et al., (2016) muestra que la variabilidad altitudinal difiere relativamente en los valores crecientes de COS tras aumentar la altitud, en parte se debe al tipo de vegetación del área de estudio. Investigación realizada en la provincia de Kerman concluye que el COS tiene cierta relación con la altitud topográfica y vegetación que son factores primordiales que influyen en las reservas de C edáfico en pastizales áridos y semiáridos (Sharafatmandrad, 2019).

Finalmente, es interesante que las áreas agrícolas respecto a pastizales registren menor contenido de COS a pesar de tener mayor NDVI y por lo tanto mayor productividad. Esto podría atribuirse en parte, por la partición de carbono subterránea y aérea (vegetal). Un estudio realizado por Sánchez et al., (2021) muestra que el contenido de carbono orgánico en hojas y raíces es ligeramente mayor en áreas de uso natural respecto a áreas con pasturas. Por otra parte, el *Stipa ichu* en zonas altoandinas almacenan mayor contenido de CO en sus hojas, seguidamente en sus tallos, raíces y flor, llegando a retener en promedio 8.67 Tn C.ha (Rivera & Zamora, 2019). Asimismo, estudio realizado en las grandes llanuras canadienses mostró que la productividad primaria subterránea en los pastizales representaba el 92% de la productividad total (Steinaker & Wilson, 2005). De igual modo, en la pampa Argentina, aunque la productividad aérea de los cultivos anuales era mayor que los pastizales nativos, sino también

el aporte aéreo de C era mayor (Veron et al., 2002). Otro aspecto que también podría explicar el menor contenido de COS en los suelos de cultivo, a pesar de su mayor productividad aérea, es la mayor temperatura del suelo en tierras de cultivo en comparación con los pastizales (Ghebrezgabher et al., 2020). En ese sentido, el carbono edáfico varia en cierta parte por el tipo de cobertura vegetal que pueden afectar el stock de COS (Merabtene et al., 2021).

VI CONCLUSIONES

Luego de haber realizado las actividades comprendidas para el presente estudio dentro de la secuencia metodológica de la investigación, se llega a las siguientes conclusiones:

1. La evaluación de la variación del carbono orgánico y la productividad de la biomasa constituyen factores trascendentes para conocer de alguna manera la dinámica de un ecosistema altoandino y consecuentemente establecer mecanismos para contribuir a la sostenibilidad ambiental y el desarrollo de las poblaciones comunitarias de la zona altoandina.
2. Respecto a la dinámica del carbono orgánico, es evidente que el mayor porcentaje de concentración de este componente, está presente en las condiciones de los pastizales comparado con los suelos agrícolas; los factores que corroboran a este fenómeno, son precisamente los procesos ecológicos que viene a ser las interacciones naturales que ocurren en los ecosistemas, una de estas acciones naturales son los ciclos biogeoquímicos, dentro de ello la descomposición de la biomasa vegetal que caen en la superficie del suelo, como es el caso de las hojarascas, restos de otros vegetales y la raíces finas de las especies herbáceas, etc. En cuanto se refiere a una de las propiedades edáficas importantes como es la densidad aparente, la mayor concentración se da en suelos agrícolas que en pastizales; siendo uno de los causales la compactación durante la realización de las

labores agrícolas y las propiedades inherentes a los suelos altoandinos. Mientras que, referente al Stock de carbono orgánico del suelo el mayor contenido de reserva de este componente se encuentra en los pastizales que en suelos agrícolas.

3. En cuanto se refiere la productividad primaria de biomasa vegetal, habiéndose evaluado una serie histórica de 9 años, desde el 2013 al 2021, los índices de vegetación diferencia normalizada NDVI permite medir y monitorear la salud y la densidad de la vegetación en la superficie terrestre, indica que en suelos de vocación agrícola es de 4% superior a zonas de pastizal. Es evidente que la mayor proporción se da en suelos de agricultura respecto a los pastizales; sin embargo; en ambos casos se da de manera casi paralela el crecimiento y decrecimiento.
4. Siendo la sostenibilidad de la generación del carbono orgánico del suelo en dos condiciones diferentes, suelos agrícolas y de pastizal en un contexto ecosistémico de una microcuenca altoandina, las estrategias para el manejo de los ecosistemas en las condiciones ecológicas del ámbito de estudio y teniendo en cuenta las condiciones de las comunidades de alta montaña, constituyen una fuente importante para orientar el manejo de tales ecosistemas a través de prácticas viables desde la perspectiva tecnológica andina por su facilidad de ser adoptado por los pobladores del ámbito de la microcuenca.

VII RECOMENDACIONES

a. La Universidad Nacional Autónoma de Huanta a través de la Escuela profesional de Ingeniería y Gestión Ambiental debe generar mecanismos que permitan articular los nexos interinstitucionales con instancias públicas del sector agrario y ambiental para poner en uso aplicativo de los conocimientos generados en la presente investigación respecto al carbono orgánico del suelo y la productividad de la biomasa vegetal a través del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

b. Compartir los resultados de la presente investigación con las organizaciones comunitarias altoandinas a fin de que conozcan y valoren la importancia del carbono orgánico del suelo y la productividad de biomasa vegetal en las condiciones de los ecosistemas altoandino y los beneficios a las que conllevan en la sostenibilidad ambiental.

c. Establecer mecanismos de difusión sobre las estrategias planteadas en el presente trabajo y que sea un referente para mantener el stock del carbono orgánico y la productividad de la biomasa vegetal en las condiciones ecosistémicas de la microcuenca de Sullcapallcca y su contribución al desarrollo del centro poblado de Canrao.

VIII REFERENCIAS

Abdul Khalil, H. P. S., Hossain, M. S., Rosamah, E., Azli, N. A., Saddon, N., Davoudpoura, Y., Islam, M. N., & Dungani, R. (2015). The role of soil properties and it's interaction towards quality plant fiber: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *43*, 1006–1015. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.099

Aguilar, S.Y. (2019).Validación del Método de Calcinación en la Determinación del Contenido de la Materia Orgánica del Suelo; Universidad Nacional Agraria La Molina: Lima, Peru. https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4154

Alcántara Boñón, G. H. (2014). *Estudio de servicios ecosistémicos*. https://zeeot.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/EE_SE_tercera_version_octubre_2014_0.pdf

Alexander, P., Rounsevell, M. D. A., Dislich, C., Dodson, J. R., Engström, K., & Moran, D. (2015). Drivers for global agricultural land use change: The nexus of diet, population, yield and bioenergy. *Global Environmental Change*, *35*, 138–147. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.08.011

Alvarado García, V., & Zúñiga Amador, M. A. (2018). Vegetación nativa como factor de control de erosión y restauración ecológica, San José, Costa Rica. *La Calera*, *18*(30), 39–47. https://doi.org/10.5377/calera.v18i30.7738

Bautista García, G., López Ortiz, S., Murillo Cuevas, F. D., Pérez Hernández, P., Ortega Jiménez, E., & López Collado, C. J. (2022). Estudio preliminar del pastoreo racional Vosin como herramienta para mejorar las condiciones del suelo después del pastoreo extensivo. *Terra Latinoamericana*, *40*, 1–12. https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.893

Blake, G.R. and Hartge, K.H. (1986) Bulk density. In: Klute, A., Ed., Methods of Soil Analysis, Part 1-Physical and Mineralogical Methods, 2nd Edition, Agronomy Monograph 9, American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, Madison, 363-382.

Bimal Kanti, P. (2017). Land Use Change and Coastal Management. In *Climatic Hazards in Coastal Bangladesh* (pp. 183–207). https://doi.org/10.1016/b978-0-12-805276-1.00006-5

Bonell Torres, A. C. (2018). Ecosistemas Altoandinos: su Importancia como Almacenes de Carbono en el Suelo bajo un Escenario de Cambio Climático. *Biodiversidad y Cambio Climático en Colombia*, *March*, 113–124.

Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Oost, K. Van, Montanarella, L., & Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, *8*(1). https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7

Calderón-Loor, M., Cuesta, F., Pinto, E., & Gosling, W. D. (2020). Carbon sequestration rates indicate ecosystem recovery following human disturbance in the equatorial Andes. *PLoS*

ONE, *15*(3), 1–23. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230612

Calle Iparraguirre, N. O., & Vargas Saldaña, M. L. (2019). *Calidad microbiológico del agua de consumo humano del sector fila Alta - Jaén, 2019*. http://repositorio.unj.edu.pe/bitstream/UNJ/188/1/Calle_INO_Vargas_SML.pdf

Canaza, D., Calizaya, E., Chambi, W., Calizaya, F., Mindani, C., Cuentas, O., Caira, C., & Huacani, W. (2023). Spatial Distribution of Soil Organic Carbon in Relation to Land Use, Based on the Weighted Overlay Technique in the High Andean Ecosystem of Puno—Peru. *Sustainability*, *15*(13), 10316. https://doi.org/10.3390/su151310316

Carbajal Morán, H., & Onofre Enriquez, F. (2020). Determinación con imágenes satelitales del índice de vegetación de diferencia normalizada del valle de Pampas-Tayacaja. *Ciencias Técnica y Aplicada*, *5*(1), 228–245. https://doi.org/10.23857/pc.v5i1.1893

Carpenter, S. R., Bennett, E. M., & Peterson, G. D. (2006). Scenarios for ecosystem services: An overview. *Ecology and Society*, *11*(1). https://doi.org/10.5751/ES-01610-110129

Caruso, C. A. (2019). *Variación espacial y temporal de la productividad primaria neta aérea y forrajera de estepas áridas y semiáridas del noroeste de Chubut*. http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/maestria/2019carusoceciliaalejandra.pdf

Charaja Quispe, E. (2008). *Variación de N, P, K y cationes cambiables en tres suelos de Puno, por efecto del cultivo de maca (Lepidium meyenii Walp.)* (Issue 051). https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RNAP_6e30d496e6354b9d0482a609375c98ed

Chen, S., Arrouays, D., Angers, D. A., Martin, M. P., & Walter, C. (2018). Soil carbon stocks under different land uses and the applicability of the soil carbon saturation concept. *Soil and Tillage Research*, *188*(September), 53–58. https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.001

Chen, S., Wang, W., Xu, W., Wang, Y., Wan, H., Chen, D., Tang, Z., Tang, X., Zhou, G., Xie, Z., Zhou, D., Shangguan, Z., Huang, J., He, J. S., Wang, Y., Sheng, J., Tang, L., Li, X., Dong, M., … Bai, Y. (2018). Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *115*(16), 4027–4032. https://doi.org/10.1073/pnas.1700298114

Daily, G. C., & Matson, P. A. (2008). Ecosystem services: From theory to implementation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *105*(28), 9455–9456. https://doi.org/10.1073/pnas.0804960105

Damgaard, C. (2014). Estimating mean plant cover from different types of cover data: a coherent statistical framework. *Ecosphere*, *5*(2), 1–7. https://doi.org/10.1890/ES13-00300.1

De la Fuente, B., Weynants, M., Bertzky, B., Delli, G., Mandrici, A., Garcia Bendito, E., & Dubois, G. (2020). Land productivity dynamics in and around protected areas globally from 1999 to 2013. *PLoS ONE*, *15*(8 August 2020), 1–13. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224958

Espinoza, Y., Lozano, Z., & Velásquez, L. (2007). Efecto de la rotación de cultivos y prácticas de labranza sobre las fracciones de la materia orgánica del suelo. *Interciencia*, *32*(8), 554–559. https://www.redalyc.org/pdf/339/33932810.pdf

Evans, R. G., & Sadler, E. J. (2018). Methods and technologies to improve efficiency of water use. *Water Resources Research*, 44(7), W00E04. https://doi.org/10.1029/2007WR006200

Fan, F., Henriksen, C. B., & Porter, J. (2016). Valuation of ecosystem services in organic cereal crop production systems with different management practices in relation to organic matter input. *Ecosystem Services*, *22*(October), 117–127. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.10.007

Flores, E. (2016). Cambio Climático: Pastizales Altoandinos y Seguridad Alimentaria. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, *1*(1), 73–80. https://doi.org/10.36580/rgem.i1.73-80

Francaviglia, R., Ledda, L., & Farina, R. (2018). *Organic Carbon and Ecosystem Services in Agricultural Soils of the Mediterranean Basin*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90309-5_6

Gabbarini, L. A., Frene, J. P., & Wall, L. G. (2017). Efecto de la rotación de cultivos en siembra directa sobre la actividad fosfatasa del suelo. *Ciencia Del Suelo*, *35*(2), 229–238. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672017000200004&lng=es&tlng=es.

Ghebrezgabher, M. G., Yang, T., Yang, X., & Eyassu Sereke, T. (2020). The of NDVI variations in responses to climate change in the Horn of Africa. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.08.003

Gómez Fernández, N. Y. (2016). Diversidad de macroinvertebrados acuáticos y calidad fisicoquímica del agua en un bofedal, distrito de Quinua. Ayacucho 2015. In *Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga* (Vol. 1). http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/574

Goodrick, I., Nelson, P. N., Banabas, M., Wurster, C. M., & Bird, M. I. (2015). Soil carbon balance following conversion of grassland to oil palm. *GCB Bioenergy*, *7*(2), 263–272. https://doi.org/10.1111/gcbb.12138

Guo, L. B., & Gifford, R. M. (2002). Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis. *Global Change Biology*, *8*(4), 345–360. https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x

Gutiérrez-Girón, A., Díaz-Pinés, E., Rubio, A., & Gavilán, R. G. (2015). Both altitude and vegetation affect temperature sensitivity of soil organic matter decomposition in Mediterranean high mountain soils. *Geoderma*, *237–238*, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.08.005

Hofstede, R., Groenendijk, J., Coppus, R., Fehse, J., & Sevink, J. (2002). Impact of pine plantations on soils and vegetation in the Ecuadorian high Andes. *Mountain Research and*

Development, 22(2), 159-167

Hooper, D. U., & Vitousek, P. M. (1998). Effects of Plant Composition and Diversity on Nutrient Cycling. *Ecological Monographs*, *68*(1), 121. https://doi.org/10.2307/2657146

Houghton, R. a. (1994). The worldwide extent of land-use change: In the last few centuries, and particularly in the last several decades, effects of land-use change have become global. *BioScience*, *44*(5), 305–313.

Huamán-Carrión, Mary L., Espinoza-Montes, Francisco, Barrial-Lujan, Abel I., & Ponce-Atencio, Yalmar. (2021). Influencia de la altitud y características del suelo en la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico de pastos naturales altoandinos. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 83-90. https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.010

Instituto Nacional de Estadística e informática - INEI. (2018). *Directorio Nacional de Centros Poblados Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. Tomo 2 Ayacucho, Cajamarca Callao y Cusco*.

Jobbagy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Its Relation to Climate and Vegetation. *Ecological Applications*, 10(2), 423. https://doi.org/10.2307/2641104

Jobbágy, E. G., Sala, O. E., & Paruelo, J. M. (2002). Patterns and Controls of Primary Production in the Patagonian Steppe: A Remote Sensing Approach. *Ecology*, *83*(2), 307–319. https://doi.org/10.2307/2680015

Julca Otiniano, A., Meneses Florián, L., Blas Sevillano, R., & Bello Amez, S. (2006). La Materia Orgánica, Importancia y Experiencia de su uso en la Agricultura. *Idesia (Arica)*, *24*(1), 49–61. https://doi.org/10.4067/s0718-34292006000100009

Kinner, D., Mitasova, H., Stallard, R., Harmon, R. S., & Toma, L. (2005). GIS-Based Stream Network Analysis for the Upper Río Chagres Basin, Panama. *The Río Chagres, Panama*, 83–95. https://doi.org/10.1007/1-4020-3297-8_6

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, *304*(5677), 1623–1627. https://doi.org/10.1126/science.1097396

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, *123*(1-2), 1-22. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032

Lavelle, P., Rodríguez, N., Arguello, O., Bernal, J., Botero, C., Chaparro, P., Gómez, Y., Gutiérrez, A., Hurtado, M. del P., Loaiza, S., Pullido, S. X., Rodríguez, E., Sanabria, C., Velásquez, E., & Fonte, S. J. (2014). Soil ecosystem services and land use in the rapidly changing orinoco river basin of colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *185*, 106–117. https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.12.020

Lei, Z., Yu, D., Zhou, F., Zhang, Y., Yu, D., Zhou, Y., & Han, Y. (2019). Changes in soil organic carbon and its influencing factors in the growth of Pinus sylvestris var. mongolica

plantation in Horqin Sandy Land, Northeast China. *Scientific Reports*, *9*(1), 1–12. https://doi.org/10.1038/s41598-019-52945-5

Leiva Sajuria, C. (2014). La agricultura y la ciencia. *Idesia (Arica)*, *32*, 3–5. https://doi.org/10.4067/S0718-34292014000300001

Liang, C., VandenBygaart, A. J., MacDonald, D., Liu, K., & Cerkowniak, D. (2023). Change in soil organic carbon storage as influenced by forestland and grassland conversion to cropland in Canada. *Geoderma Regional*, *33*, e00648. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00648

Liu, Z., Fu, B., Zheng, X., & Liu, G. (2010). Plant biomass, soil water content and soil N:P ratio regulating soil microbial functional diversity in a temperate steppe: A regional scale study. *Soil Biology and Biochemistry*, *42*(3), 445–450. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.11.027

Locatelli, B., Kannien, M., Brockhaus, M., Pierce Colfer, C., Murdiyarso, D., & Santoso, H. (2009). *Ante un futuro incierto: Cómo se pueden adaptar los bosques y las comunidades al cambio climático*. https://doi.org/10.17528/cifor/002842

López Fando, C., & Pardo, M. T. (2011). Soil carbon storage and stratification under different tillage systems in a semi-arid region. *Soil and Tillage Research*, *111*(2), 224–230. https://doi.org/10.1016/j.still.2010.10.011

Ma, S., Wang, L. J., Zhu, D., & Zhang, J. (2021). Spatiotemporal changes in ecosystem services in the conservation priorities of the southern hill and mountain belt, China. *Ecological Indicators*, *122*, 107225. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107225

Madrigal Martínez, S., & Miralles García, J. L. (2019). Land-change dynamics and ecosystem service trends across the central high-Andean Puna. *Scientific Reports*, *9*(1), 1–12. https://doi.org/10.1038/s41598-019-46205-9

Malki, F., Al Karkouri, J., Sabir, M., Ibijbijen, J., El Mderssa, M., Ikraoun, H., & Dallahi, Y. (2022). Assessment of the storage potential of organic carbon in Maamora forest soils: A strategic guidance tool for reforestation. *Soil and Environment*, *41*(1), 13–21. https://doi.org/10.25252/SE/2022/232782

Martinelli, L. A. (2012). Ecosystem Services and Latin America and Ecosystem Services and Agricultural Production in Latin America and Caribbean. *Inter American Development Bank*, 1–16. https://publications.iadb.org/en/ecosystem-services-and-agricultural-production-latin-america-and-caribbean

McLauchlan, K. (2006). The nature and longevity of agricultural impacts on soil carbon and nutrients: A review. *Ecosystems*, *9*(8), 1364–1382. https://doi.org/10.1007/s10021-005-0135-1

Merabtene, M. D., Faraoun, F., Mlih, R., Djellouli, R., Latreche, A., & Bol, R. (2021). Forest Soil Organic Carbon Stocks of Tessala Mount in North-West Algeria-Preliminary

Estimates. *Frontiers in Environmental Science*, *8*(January), 1–9. https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.520284

Milleret, R., Le Bayon, R. C., & Gobat, J. M. (2009). Root, mycorrhiza and earthworm interactions: Their effects on soil structuring processes, plant and soil nutrient concentration and plant biomass. *Plant and Soil*, *316*(1–2), 1–12. https://doi.org/10.1007/s11104-008-9753-7

Mukumbuta, I., & Hatano, R. (2020). Do tillage and conversion of grassland to cropland always deplete soil organic carbon? *Soil Science and Plant Nutrition*, *66*(1), 76–83. https://doi.org/10.1080/00380768.2019.1676135

Municipalidad Provincial de Huanta. (2013). *Ordenanza Municipal N° 009-2013-MPH/CM* (p. 07). https://munihuanta.gob.pe/wp-content/uploads/2018/10/Ordenanza-Municipal-N°-009-2013-MPH.pdf

Neina, D., & Agyarko-Mintah, E. (2022). Duration of Cultivation Has Varied Impacts on Soil Charge Properties in Different Agro-Ecological Zones of Ghana. *Land*, *11*(10), 1–17. https://doi.org/10.3390/land11101633

Ordoñez, M. C., Galicia, L., Figueroa, A., Bravo, I., & Peña, M. (2015). Effects of peasant and indigenous soil management practices on the biogeochemical properties and carbon storage services of Andean soils of Colombia. *European Journal of Soil Biology*, *71*, 28–36. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.10.001

Palareti, G., Legnani, C., Cosmi, B., Antonucci, E., Erba, N., Poli, D., Testa, S., & Tosetto, A. (2016). Land use as a driver of soil fertility and biodiversity across an agricultural landscape in the Central Peruvian Andes. *International Journal of Laboratory Hematology*, *38*(1), 42–49. https://doi.org/10.1111/ijlh.12426

Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., & Verón, S. R. (2005). Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy*, *15*(87), 14–23.

Pimentel, D. (2006). Soil erosion: A food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability*, *8*(1), 119–137. https://doi.org/10.1007/s10668-005-1262-8

Pimentel, D., & Burgess, M. (2013). Soil erosion threatens food production. *Agriculture*, 3(3), 443–463. https://doi.org/10.3390/agriculture3030443

Portal Quicaña, E., & Chavez Moscoso, R. (2021). *Estrategia Y Plan De Acción Regional Para La Diversidad Biológica Ayacucho Al 2021* (pp. 1–91). https://www.cbd.int/doc/nbsap/sbsap/pe-sbsap-ayacucho-es.pdf

Quiroz, R. C. (2018). Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos. In *Minam* (Biibliotec). http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/5.-merese.pdf

Quispe Mayta, R. W. (2017). Almacenamiento de carbono en pastizales naturales con y sin

práctica de restauración del paraje Lomo Largo – Jauja. *Universidad Nacional Del Centro Del Perú*. http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/4398

Rahman, S. (2003). Environmental impacts of modern agricultural technology diffusion in Bangladesh: An analysis of farmers' perceptions and their determinants. *Journal of Environmental Management*, *68*(2), 183–191. https://doi.org/10.1016/S0301-4797(03)00066-5

Reicosky, D. C., & Allmaras, R. R. (2003). Advances in tillage research in North American cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 50(1-2), 125-134. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00037-2

Renison, D., Hensen, I., & Suarez, R. (2011). Landscape structural complexity of high-mountain Polylepis australis forests: A new aspect of restoration goals. *Restoration Ecology*, *19*(3), 390–398. https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2009.00555.x

Reyna, L., & Gossweiler, B. (2011). Segmentación y clasificación de imágenes satelitales para determinar la cobertura del suelo. *Revista de Las Agrociencias. ISSN 2477-8982*, *4*, 38. https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i4.663

Rivera Ticllacondor, E., & Zamora Talaverano, N. S. (2019). Evaluación del potencial almacenamiento de carbono en Stipa Ichu (Ruiz & Pav) Kunth 1829 (Ichu) en la microcuenca Chaclatacana, Huancavelica, Perú. *The Biologist (Lima)*, *17*(2), 237–247. https://revistas.unfv.edu.pe/rtb/article/download/351/318/1307

Rojas, J. M., & Peña, S. (2012). Densidad aparente: Comparación de métodos de determinación en ensayo de rotaciones en siembra directa. In *1* (Vol. 1, Issue 1). www.inta.gov.ar/saenzpe

Rolando, J. L., Turin, C., Ramírez, D. A., Mares, V., Monerris, J., & Quiroz, R. (2017). Key ecosystem services and ecological intensification of agriculture in the tropical high-Andean Puna as affected by land-use and climate changes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *236*, 221–233. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.010

Rowntree, J. E., Stanley, P. L., Maciel, I. C. F., Thorbecke, M., Rosenzweig, S. T., Hancock, D. W., Guzman, A., & Raven, M. R. (2020). Ecosystem Impacts and Productive Capacity of a Multi-Species Pastured Livestock System. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.544984

Sainepo, B. M., Gachene, C. K., & Karuma, A. (2018). Assessment of soil organic carbon fractions and carbon management index under different land use types in Olesharo Catchment, Narok County, Kenya. *Carbon Balance and Management*, *13*(1). https://doi.org/10.1186/s13021-018-0091-7

Sánchez Irigoin, I., Núñez Bustamante, E., Abanto Rodriguez, C., & Murga Orrillo, H. (2021). Variaciones en la captura de carbono por cambio de uso de suelo, en zonas de páramo en Cajamarca, Perú. *Revista Nor@ndina*, *4*(2), 25–33. https://doi.org/10.37518/2663-6360x2021v4n2p25

Schulte, E. E., & Hopkins, B. G. (1996). Estimation of organic Matter by Weight Loss-on-Ignition. *Soil Organic Matter: Analysis and Interpretation*, *46*, 21–31. https://doi.org/10.2136/sssaspecpub46.c3

Shapkota, J., & Kafle, G. (2021). Variation in soil organic carbon under different forest types in Shivapuri Nagarjun National Park, Nepal. *Scientifica*, *2021*. https://doi.org/10.1155/2021/1382687

Sharafatmandrad, M. (2019). Soil carbon in arid and semiarid rangelands: controlling factors. *Arabian Journal of Geosciences*, *12*(9). https://doi.org/10.1007/s12517-019-4489-7

Shedayi, A. A., Xu, M., Naseer, I., & Khan, B. (2016). Altitudinal gradients of soil and vegetation carbon and nitrogen in a high altitude nature reserve of Karakoram ranges. *SpringerPlus*, *5*(1). https://doi.org/10.1186/s40064-016-1935-9

Shiferaw, A., Yimer, F., & Tuffa, S. (2019). Changes in Soil Organic Carbon Stock Under Different Land Use Types in Semiarid Borana Rangelands: Implications for CO2 Emission Mitigation in the Rangelands. *Journal of Agricultural Science and Food Research*, *10*(1), 1–6. https://doi.org/10.35248/2593-9173.19.10.254

Shrestha, G., & Stahl, P. D. (2008). Carbon accumulation and storage in semi-arid sagebrush steppe: Effects of long-term grazing exclusion. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *125*(1–4), 173–181. https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.12.007

Somovilla, D., Páez, R., Jobbágy, E., & Nosetto, M. (2019). Cambios en el contenido de carbono orgánico del suelo tras el rolado de bosques secos de San Luis (Argentina). *Ecologia Austral*, 112–119. https://doi.org/10.25260/EA.19.29.1.0.815

Soussana, J. -F., Loiseau, P., Vuichard, N., Ceschia, E., Balesdent, J., Chevallier, T., & Arrouays, D. (2004). Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use and Management*, 20(2), 219–230. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2004.tb00362.x

Stavi, I., Bel, G., & Zaady, E. (2016). Soil functions and ecosystem services in conventional, conservation, and integrated agricultural systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *36*(2). https://doi.org/10.1007/s13593-016-0368-8

Steinaker, D. F., & Wilson, S. D. (2005). Belowground litter contributions to nitrogen cycling at a northern grassland - forest boundary. Ecology, 86(10), 2825–2833. https://doi.org/10.1890/04-0893

Sylvester, S. P., Heitkamp, F., Sylvester, M. D. P. V., Jungkunst, H. F., Sipman, H. J. M., Toivonen, J. M., Gonzales Inca, C. A., Ospina, J. C., & Kessler, M. (2017). Relict high-Andean ecosystems challenge our concepts of naturalness and human impact. *Scientific Reports*, *7*(1), 1–13. https://doi.org/10.1038/s41598-017-03500-7

Taufik, A., Syed Ahmad, S. S., & Ahmad, A. (2016). Classification of landsat 8 satellite data

using NDVI thresholds. *ResearchGate*, *January*. https://www.researchgate.net/publication/309769591%0AClassification

Teague, R., & Kreuter, U. (2020). Managing Grazing to Restore Soil Health, Ecosystem Function, and Ecosystem Services. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *4*(September), 1–13. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.534187

Van Bemmelen, J. (1890). Über die Bestimmung des Wassers, des Humus, des Schwefels, der in den colloïdalen Silikaten gebundenen Kieselsäure, des Mangans u. s. w. im Ackerboden. *Die Landwirthschaftlichen Versuchs-Stationen*, *37*, 279–290. https://edepot.wur.nl/211282

Veron, S. R., Paruelo, J. M., Sala, O. E., & Lauenroth, W. K. (2002). Environmental Controls of Primary Production in Agricultural Systems of the Argentine Pampas. Ecosystems. https://doi.org/10.1007/s10021-002-0145-1

Viglizzo, E. F., Frank, F. C., Carreño, L. V., Jobbágy, E. G., Pereyra, H., Clatt, J., Pincén, D., & Ricard, M. F. (2011). Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology*, *17*(2), 959–973. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02293.x

Villarino, S. H., Studdert, G. A., & Laterra, P. (2019). How does soil organic carbon mediate trade-offs between ecosystem services and agricultural production? *Ecological Indicators*, *103*(November 2018), 280–288. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.027

Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobley, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N., Wollschläger, U., Vogel, H. J., & Kögel-Knabner, I. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333(November 2017), 149–162. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026

Winowiecki, L., Vågen, T. G., & Huising, J. (2014). Effects of land cover on ecosystem services in Tanzania: A spatial assessment of soil organic carbon. *Geoderma*, *263*, 274–283. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.010

Wyngaard, N., Crespo, C., Angelini, H., Eyherabide, M., Larrea, G., Reussi Calvo, N., Carciochi, W., Sainz Rozas, H. (2022). The effect of agriculture on topsoil carbon stocks is controlled by land use, climate, and soil properties in the Argentinean Pampas. *CATENA* 212, 106126. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106126

Yang, S., Jansen, B., Absalah, S., Van Hall, R. L., Kalbitz, K., & Cammeraat, E. H. E. (2020). Lithology-and climate-controlled soil aggregate-size distribution and organic carbon stability in the Peruvian Andes. *Soil*, *6*(1), 1–15. https://doi.org/10.5194/soil-6-1-2020

Yost, J. L., & Hartemink, A. E. (2019). Soil organic carbon in sandy soils: A review. In *Advances in Agronomy* (1st ed., Vol. 158). https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.07.004

Zanabria, R., & Cuellar, J. (2015). Carbono total almacenado en los depósitos de diferentes

sistemas de uso de tierra del ecosistema alto andino, valle del Mantaro, Junín. *Xilema, 28*, 43-52. http://190.119.243.75/index.php/xiu/article/view/597%0Ahttp://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/xiu/article/view/597/580

Zhao, W., Hu, Z., Li, S., Guo, Q., Yang, H., & Zhang, T. (2017). Impact of land use conversion on soil organic carbon stocks in an agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia. *Journal of Geographical Sciences*, *27*(8), 999–1010. https://doi.org/10.1007/s11442-017-1417-1

IX ANEXOS

Figura 7

Área de estudio de la microcuenca Sullccapallcca

Figura 8

Zona de estudio con presencia de pastizal

Figura 9

Zona de estudio con presencia agrícola

Figura 10

Recolección de submuestras de suelo para Da

Figura 11

Recolección de submuestras de suelo para COS

Figura 12

Muestras de suelo para su posterior secado en una estufa

Figura 13

Muestras de suelo tamizado

Figura 14

Registro de peso para su calcinación

Figura 15

Calcinación de muestras de suelo en una mufla

Tabla 4

Datos del área de estudio

Puntos muestreados	Variables ambientales			Propiedades edáficas		
	Altitud (m.s.n.m.)	Pendiente (%)	NDVI	Carbono orgánico del suelo (%)	Densidad aparente del suelo (g/cm^3)	Stock de COS ($Tn.ha^{-1}$)
Pastizal						
1	3771	39.013	0.4733	11.856	1.1192	265.38
2	3761	66.468	0.5542	11.106	1.1254	249.97
3	3864	32.062	0.5777	15.469	1.0828	334.99
4	3780	40.403	0.4987	11.211	1.0291	230.74
5	3832	43.081	0.5014	12.065	0.8636	208.38
6	3924	79.158	0.4837	12.642	0.9808	247.98
7	3960	60.083	0.4995	16.251	0.7894	256.57
8	3988	57.271	0.5233	11.871	1.0727	254.68
9	4014	74.525	0.4700	8.978	0.9515	170.87
10	3996	52.326	0.4957	13.942	1.0323	287.84
11	3972	77.006	0.5154	10.040	1.0933	219.54
12	4045	68.731	0.4881	11.250	1.0970	246.83
13	4030	42.450	0.4980	12.421	1.2175	302.44
14	4005	54.571	0.6306	7.220	1.4326	206.87
15	3977	60.166	0.4866	9.661	1.2469	240.92
16	4072	48.166	0.4629	13.894	0.8486	235.82
Agricultura						
1	3804	68.600	0.4955	8.844	1.2869	227.63
2	3777	10.770	0.5092	6.190	1.5998	198.04
3	3775	46.519	0.5799	8.745	1.1115	194.41
4	3753	31.780	0.5457	10.263	1.0575	217.06
5	3798	11.045	0.5510	10.065	1.2178	245.15
6	3838	21.024	0.5035	11.179	1.1198	250.35
7	3884	44.721	0.5040	14.998	0.8185	245.52
8	3949	24.000	0.5868	13.106	0.9582	251.15
9	4018	60.166	0.4809	11.455	0.9573	219.31
10	3963	35.014	0.5148	7.294	1.4940	217.96
11	3947	27.893	0.6041	12.127	0.8894	215.72
12	3949	54.918	0.5769	8.236	0.9782	161.14
13	3716	52.953	0.5386	9.273	1.3573	251.73
14	3917	43.174	0.6782	7.630	0.8519	130.00
15	3970	53.310	0.4614	9.616	1.4710	282.91
16	3976	33.015	0.4857	11.318	0.9466	214.27

Tabla 5

Datos de NDVI mensual y anual

	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)			
Mensual	Pastizal	Error estándar	Agricultura	Error estándar
Febrero	0.5761	0.0242	0.6347	0.0295
Marzo	0.6097	0.0182	0.6646	0.0167
Abril	0.6175	0.0148	0.6333	0.0233
Mayo	0.5698	0.0210	0.6050	0.0240
Junio	0.5258	0.0175	0.5539	0.0227
Julio	0.4712	0.0203	0.4991	0.0260
Agosto	0.4496	0.0237	0.4669	0.0270
Setiembre	0.4973	0.0186	0.5395	0.0242
Anual				
2013	0.5272	0.0277	0.5310	0.0346
2014	0.4646	0.0259	0.4793	0.0303
2015	0.4551	0.0213	0.4762	0.0249
2016	0.5282	0.0289	0.5521	0.0327
2017	0.5285	0.0207	0.5638	0.0205
2018	0.5074	0.0185	0.5509	0.0199
2019	0.4849	0.0246	0.5220	0.0274
2020	0.5189	0.0320	0.5451	0.0367
2021	0.5517	0.0229	0.5968	0.0276

Tabla 6

Resumen del análisis estadístico de t de Student

	Prueba t pareada	Diferencias			
Variables	P value	Media	Error estándar	Intervalo de confianza (95%)	R^2
Densidad aparente (mg/cm^3)	0.2942	-0.07	0.065	-0.209 a 0.068	0.07
Carbono orgánico (%)	0.0174	1.846	0.69	0.37 a 3.319	0.32
Stock de C ($Tn.ha^{-1}$)	0.0485	-27.34	12.73	-54.47 a -0.2052	0.24
NDVI	0.0067	0.02858	0.0090	0.0091 a 0.04797	0.40

Figura 16: *Mapa de puntos de muestreo de suelo*

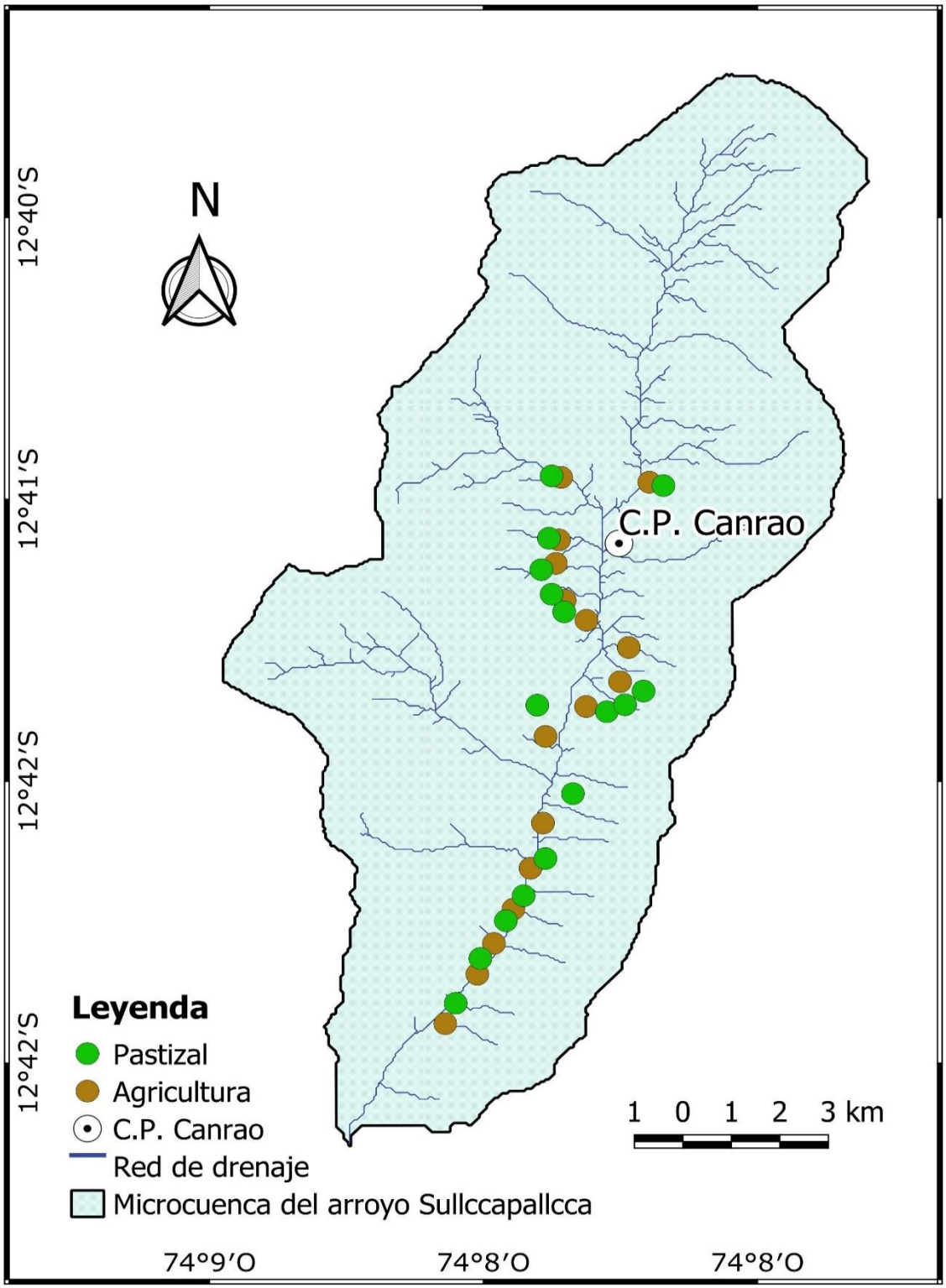


Tabla 7

Puntos georreferenciados de muestreo de suelo

PUNTOS DE MUESTREO DE SUELO GEORREFERENCIADO																
Agricultura																
Coordenada	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
Este (E)	593222	593388	593474	593575	593664	593729	593744	593953	594129	594174	593957	593845	593800	593817	593829	594283
Norte (S)	8595341	8595612	8595781	8595969	8596194	8596442	8596918	8597082	8597218	8597406	8597556	8597667	8597869	8597998	8598342	8598314
Pastizal																
Coordenada	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
Este (E)	593276	593404	593536	593628	593741	593884	593702	594060	594154	594250	593842	593778	593725	593765	593780	594356
Norte (S)	8595453	8595699	8595906	8596043	8596247	8596603	8597090	8597053	8597091	8597166	8597603	8597700	8597835	8598008	8598350	8598295