

# UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



*Una Institución Adventista*

**Determinación del secuestro de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en el suelo mediante sumideros de carbono: Puyas de Raimondi (*Puya raimondii* Harms), Pajonal con Chillihuales y Bofedal, en el distrito de Putina – Puno, 2018**

Por:

Daniel Magno Mamani Quispe

Henry Omar Mamani Mamani

Asesora:

Ing. Pari Mamani Verónica Haydee

**Juliaca, octubre de 2019**

DECLARACIÓN JURADA  
DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

Ing. Verónica Haydee Pari Mamani, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: "DETERMINACIÓN DEL SECUESTRO DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>) EN EL SUELO MEDIANTE SUMIDEROS DE CARBONO: PUYAS DE RAIMONDI (*Puya raimondii* Harms), PAJONAL CON CHILLIHUARES Y BOFEDAL, EN EL DISTRITO DE PUTINA – PUNO, 2018" constituye la memoria que presenta los bachilleres Daniel Magno Mamani Quispe y Henry Omar Mamani Mamani para aspirar al título Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en el distrito de Putina bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad de los autores, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Juliaca, a los 16 días del mes de octubre del año 2019.



---

Ing. Verónica Haydee Pari Mamani  
Asesora

“Determinación del secuestro de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en el suelo mediante sumideros de carbono: Puyas de Raimondi (*Puya raimondii* Harms), Pajonal con Chillihuares y Bofedal, en el distrito de Putina – Puno, 2018”

# TESIS

Presentado para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental

## JURADO CALIFICADOR



Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera  
**Presidente**



MSc. Rose Adeline Callata Chura  
**Secretaria**



MSc. Jael Calla Calla  
**Vocal**



Ing. Verónica Haydeé Pari Mamani  
**Asesora**

Juliaca, 16 de octubre de 2019

## **Dedicatoria 1**

A mi mamá, Sonia;

A mi papá, Honorato;

A mi hermanita(os), Ruth, Idel y Damián.

Por todo el apoyo que me brindaron en los momentos precisos y ser la  
motivación y fortaleza.

## **Dedicatoria 2**

A mi mamá, Isabel;

A mi papá, Lelis;

A mis hermanos: Doris y Jeanpaul.

Por su apoyo incondicional y ser la motivación.

## **Agradecimiento 1**

A Dios por guiarme y permitir el cumplimiento de mis sueños y planes.

Al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo (PRONABEC) por la  
oportunidad que me brindó para estudiar.

A la Universidad Peruana Unión por brindarme una educación redentora  
para esta vida y eternidad, por desarrollar en mí la integridad, el  
espíritu misionero y la capacidad de innovar.

A mi asesora y jurados dictaminadores por ser mentor y guiarnos en los  
procesos de la investigación.

A MSc. Jael en particular por contribuir en la investigación.

Y a todas las personas que participaron de este trabajo de investigación, y  
contribuyeron a su realización.

## **Agradecimiento 2**

A Dios; por la vida, por las grandes bendiciones que en mí obró.

Al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo (PRONABEC), por darme la gran oportunidad de estudiar.

A la Universidad Peruana Unión, por brindarme una educación redentora y saludable; y por, sobre todo, fortalecer mi espíritu.

A mis apreciados padres, por brindarme siempre su apoyo incondicional, por instruirme desde mi infancia y, por encima de todo, proveerme su infinito y cálido amor.

A mis hermanos, por estar siempre conmigo en los buenos y malos momentos, por su entera confianza y paciencia.

A mis buenos amigos, en especial a “SHÓMIYAM’s Club”.

Y a todas las personas que participaron de este trabajo de investigación, y contribuyeron a su realización, en particular al MSc. Jael Calla Calla.

## Tabla de contenido

RESUMEN .....	xvi
ABSTRACT .....	xvii
CAPÍTULO I.....	18
EL PROBLEMA .....	18
1.1 Identificación del problema .....	18
1.2 Justificación .....	19
1.3 Presuposición filosófica.....	20
1.4 Objetivos de la investigación.....	21
1.4.1 Objetivo general.....	21
1.4.2 Objetivo específico .....	21
CAPÍTULO II.....	22
REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	22
2.1 Antecedentes de investigación.....	22
2.1.1 Antecedentes internacionales.....	22
2.1.2 Antecedentes nacionales .....	24
2.1.3 Antecedentes locales .....	24
2.2 Revisión de la literatura .....	26
2.2.1 Cambio climático .....	26
2.2.2 Efecto invernadero.....	26
2.2.3 Secuestro de dióxido de carbono .....	28
2.2.4 Carbono orgánico del suelo .....	29

2.2.5	Ciclo del carbono .....	30
2.2.6	Suelo .....	33
2.2.7	Propiedades del suelo.....	34
2.2.8	Sumideros de carbono.....	42
2.3	Métodos de estimación de CO <sub>2</sub> .....	46
2.3.1	Métodos para estimar carbono en el suelo .....	46
2.3.2	Protocolo de muestreo .....	46
CAPÍTULO III .....		47
MATERIALES Y MÉTODOS.....		47
3.1	Ámbito de estudio.....	47
3.1.1	Ubicación .....	47
3.1.2	Delimitación del área de estudio.....	47
3.1.3	Determinación de los puntos de muestreo .....	48
3.1.4	Características climatológicas.....	50
3.1.5	Selección de los parámetros a evaluar .....	51
3.1.6	Geología.....	51
3.2	Diseño y tipo de investigación.....	52
3.2.1	Enfoque .....	52
3.2.2	Diseño .....	52
3.3	Materiales y equipos .....	52
3.4	Procedimiento .....	53
3.4.1	Muestreo de suelos.....	53

3.4.2	Análisis de los parámetros físico-químicos .....	54
3.4.3	Metodología para la estimación del secuestro de carbono.....	55
3.5	Flujograma del desarrollo de la investigación .....	56
3.6	Análisis estadístico .....	57
3.6.1	Arreglo factorial.....	57
3.6.2	Prueba de hipótesis .....	57
CAPÍTULO IV .....		58
RESULTADOS Y DISCUSIONES .....		58
4.1	Caracterización de suelo de los sumideros .....	58
4.2	COS y secuestro de CO <sub>2</sub> en sumideros a diferentes profundidades.....	62
4.2.1	Resultados de la prueba estadística.....	67
CAPÍTULO V .....		76
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		76
5.1	Conclusiones .....	76
5.2	Recomendaciones .....	77
REFERENCIAS .....		79

## Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación taxonómica de Puya de Raimondi .....	43
Tabla 2. Visión general de los principales organismos del suelo según su tamaño .....	46
Tabla 3. Delimitación política del lugar de estudio.....	48
Tabla 4. Coordenadas UTM del lugar de estudio.....	48
Tabla 5. Coordenadas UTM de los puntos de muestreo de la zona de estudio .....	49
Tabla 6. Columna estratigráfica del área de estudio.....	52
Tabla 7. Materiales utilizados durante en la ejecución de la investigación.....	53
Tabla 8. Metodología de análisis de los parámetros.....	54
Tabla 9. Resumen y comparación de los parámetros del suelo. ....	61
Tabla 10. Análisis de varianza del secuestro de CO <sub>2</sub> para sumideros y profundidades. ....	67
Tabla 11. Comparación de medias de secuestro de CO <sub>2</sub> para profundidades. ....	68
Tabla 12. Comparación de medias de secuestro de CO <sub>2</sub> para sumideros.....	68
Tabla 13. Comparación del CO <sub>2</sub> total, en promedio, secuestrado en diferentes sumideros y profundidades. ....	71

## Índice de figuras

Figura 1. Ciclo terrestre de carbono, carbono del suelo y el carbono global disponible.....	27
Figura 2. Modelo de la dinámica del carbono en el suelo .....	28
Figura 3. Secuestro de carbono, suelo como depósito de carbono .....	29
Figura 4. Mapa del contenido de COS a un metro de profundidad (t C/ha).....	30
Figura 5. Proceso de la fotosíntesis, fase lumínica y oscura .....	32
Figura 6. Composición por volumen de un suelo de textura media .....	33
Figura 7. Mapa de ubicación del área de estudio .....	49
Figura 8. Mapa del área de investigación y puntos de muestreo de los sumideros .....	50
Figura 9. Temperatura máxima y mínima promedio mensual.....	51
Figura 10. Esquema y diseño de muestreo de suelo .....	54
Figura 11. Metodología resumida en el flujograma .....	56
Figura 12. Comparación de la media de COS secuestrado a diferentes profundidades .....	62
Figura 13. Distribución del COS a diferentes profundidades.....	63
Figura 14. Comparación de media de CO <sub>2</sub> secuestrado a diferentes profundidades.....	63
Figura 15. Distribución de CO <sub>2</sub> a diferentes profundidades.....	64
Figura 16. CO <sub>2</sub> total secuestrado a 60 cm de profundidad en los sumideros de Bellavista – Putina, 2018.....	66
Figura 17. Mapa de stocks de carbono sobre el suelo con una resolución de una hectárea para el Perú .....	103
Figura 18. Distribución de ecosistemas altoandinos relacionados con los sumideros evaluados. ....	104

## Índice de anexos

Anexo A. Certificado de resultados de análisis de suelos.....	92
Anexo B. Certificado de resultados de análisis de suelos .....	93
Anexo C. Tabla de interpretación.....	94
Anexo D. Certificado de resultados de análisis de densidad aparente .....	95
Anexo E. Cálculo de carbono orgánico del suelo y dióxido de carbono.....	96
Anexo F. Gráfico de metadatos para COS .....	97
Anexo G. Gráfico de metadatos para CO <sub>2</sub> .....	98
Anexo H. Base de datos de los parámetros de sumideros y profundidades .....	99
Anexo I. Fotos de área de estudio.....	101
Anexo J. Panel fotográfico .....	102
Anexo K. Mapa de stocks de carbono sobre el suelo del Perú.....	103
Anexo L. Distribución de algunos ecosistemas altoandinos .....	104
Anexo M. Servicios ambientales de bofedales y opciones de respuesta basadas en el manejo de tierra .....	105

## SÍMBOLOS USADOS

<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático)
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)
<b>USDA</b>	United States Department of Agriculture (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica)
<b>MINAM</b>	Ministerio del Ambiente
<b>GEI</b>	Gases de efecto invernadero
<b>MO</b>	Materia orgánica
<b>%MOS</b>	Porcentaje de materia orgánica del suelo
<b>C</b>	Carbono
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>COS</b>	Carbono orgánico del suelo
<b>tC</b>	Tonelada de carbono
<b>ha</b>	Hectárea
<b>t/ha</b>	Toneladas por hectárea
<b>tC/ha</b>	Toneladas de carbono por hectárea
<b>tCO<sub>2</sub>/ha</b>	Toneladas de dióxido de carbono por hectárea
<b>pH</b>	Potencial de hidrógeno
<b>CE</b>	Conductividad eléctrica
<b>N</b>	Nitrógeno
<b>P</b>	Fósforo
<b>K</b>	Potasio
<b>Da</b>	Densidad aparente

<b>s1</b>	Sumidero I, Puyas de Raimondi ( <i>Puya raimondii</i> Harms)
<b>s2</b>	Sumidero II, Pajonal con Chillihuales
<b>s3</b>	Sumidero III, Bofedal
<b>p1</b>	Profundidad 1, 0-10 cm, espesor 10 cm
<b>p2</b>	Profundidad 2, 10-30 cm, espesor 20 cm
<b>p3</b>	Profundidad 3, 30-60 cm, espesor 30 cm
<b>g/cm<sup>3</sup></b>	Gramos por centímetro cúbico
<b>nm</b>	Nanómetro

## RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue determinar el secuestro de dióxido de carbono en el suelo mediante sumideros de carbono: Puya de Raimondi (*Puya de raimondii* Harms), Pajonal con Chillihuales y Bofedal en la comunidad de Bellavista del distrito de Putina, departamento Puno. La investigación fue no experimental descriptivo transversal. Se evaluó la Da, MO y el COS, el muestreo se realizó en nueve puntos de forma aleatoria en los sumideros (s1, s2 y s3), en tres profundidades de 0-10, 20-30 y 30-60 cm. Para el análisis estadístico, el diseño fue arreglo factorial de 3x3, con 9 tratamientos y tres repeticiones por tratamiento, haciendo un total de 27 unidades experimentales. Los resultados indican que no hay diferencia significativa ( $p= 0.012 > p= 0.01$ ) entre sumideros, sin embargo, existe diferencia significativa en las profundidades ( $p= 0.005 < P=0.01$ ). Por lo cual, el sumidero que mayor secuestro de dióxido de carbono reportó (prueba Duncan) fue el Bofedal, seguido por Pajonal con Chillihuales y finalmente las Puyas de Raimondi, los cuales registraron un valor de 501.96 (44 %), 442.05 (39 %) y 187.68 (17 %) tCO<sub>2</sub>/ha respectivamente. Por lo tanto, se demostró que los suelos de la comunidad de Bellavista del distrito de Putina tienen un gran potencial para capturar el dióxido de carbono, coadyubando así a los esfuerzos tendientes a disminuir el cambio climático.

**Palabras claves:** Sumideros de carbono, Cambio climático, Secuestro de carbono.

## ABSTRACT

The objective of the present research was to determine carbon dioxide sequestration in the soil through carbon sinks: Raimondi's Puya (*Puya de raimondii* Harms), Pajonal with Chillihuares and Bofedal in the community of Bellavista of Putina district, Puno region. The research was non-experimental, cross-sectional. The Da, MO and COS were evaluated, the sampling was carried out in nine points in a random way in the sinks (s1, s2 and s3), in three depths of 0-10, 20-30 and 30-60 cm. For the statistical analysis, the design was a 3x3 factorial arrangement, with 9 treatments and three repetitions per treatment, making a total of 27 experimental units. The results indicate that there is no significant difference ( $p = 0.012 > p = 0.01$ ) between sinks, however, there is a significant difference in the depths ( $p = 0.005 < P = 0.01$ ). Therefore, the sink that reported the largest carbon dioxide sequestration (Duncan test) was the Bofedal, followed by Pajonal with Chillihuares and finally the Raimondi's Puya, which registered a value of 501.96 (44%), 442.05 (39%) and 187.68 (17%) tCO<sub>2</sub> / ha respectively. Therefore, it was shown that the soils of the Bellavista community in the district of Putina have a great potential in terms of the sequestration of carbon dioxide, thus contributing to efforts to reduce climate change.

**Key words:** Carbon sinks, Climate change, Carbon sequestration.

## **CAPÍTULO I**

### **EL PROBLEMA**

#### **1.1 Identificación del problema**

A nivel mundial uno de los principales problemas es el cambio climático, el cual es causado por el aumento de concentración de gases de efecto invernadero (GEI) (Arango, 2011; IPCC, 2014; Cambou et al., 2018), por ello a mayor concentración de estos gases mayor será el impacto, en este sentido la alternativa de solución consiste en aplicar medidas de reducción/mitigación de los GEI para minimizar este problema.

Uno de los principales gases de efecto invernadero es el CO<sub>2</sub>, un gas que comúnmente se encuentra en la atmósfera y es emitido de forma natural y antropogénica. La acepción que toma la IPCC (2018) es la segunda, pues la emisión de este gas proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles y cambios en uso de suelo de terrenos forestales desde la revolución industrial. Estas actividades señaladas han contribuido a un incremento del 40% en la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>, es decir, de 280 ppm en 1750 a 403.64 ppm en octubre de 2017 (Dlugokencky & Tans, 2017; Aquino et al., 2018).

Esto significa que la temperatura en la tierra aumenta cada año y si esto continúa y no se adoptan medidas de mitigación para reducir la concentración del CO<sub>2</sub>, se tendrán severas consecuencias: escases de agua, afección de ecosistemas en cadena, inundaciones, sequías, efectos sobre la salud, mal nutrición y contaminación atmosférica (Galán, 2009). Por lo que es esencial adoptar un cierto número de medidas para reducir los GEI y para incrementar su captura y secuestro en la biomasa y los suelos (FAO, 2002).

Los sumideros de carbono contribuyen a la reducción y mitigación del cambio climático. De acuerdo con Zhu et al. (2015) los ecosistemas forestales tuvieron gran potencial como sumideros de C, asimismo, Mu et al (2014) dio a conocer que las tierras forestales contribuyeron al enriquecimiento del suelo gracias a la descomposición de la materia orgánica (MO) y a la formación del humus. No obstante, a ligeras reducciones del contenido de COS podría aumentar significativamente emisiones de CO<sub>2</sub> en la atmosfera. La reducción del COS principalmente se debe a los cambios en el uso del suelo o las tasas de erosión (Mu et al., 2014).

Por lo cual, en el presente trabajo se avaluó los parámetros físico-químicos del suelo, con el objetivo de determinar el COS y demostrar que los suelos de la comunidad de Bellavista del distrito de Putina tienen un gran potencial para capturar el CO<sub>2</sub>.

## **1.2 Justificación**

La estimación y comparación del secuestro del CO<sub>2</sub> en el suelo mediante sumideros de carbono: Puyas de Raimondi (*Puya raimondii* Harms), Pajonal con Chillihuales y Bofedal en las laderas de la Comunidad de Bellavista es importante debido a que en la actualidad se sabe que todos los ecosistemas terrestres tienen la capacidad de capturar y secuestrar el carbono de la atmósfera (Benjamín & Masera, 2001).

Por ende, fue importante estimar la cantidad de secuestro de carbono en el suelo y ver cuál de los tres sumideros tiene mayor capacidad. Además, es necesario la estimación y comparación debido a que la presente investigación contribuirá a la aplicación de estrategias en la mitigación del cambio climático.

En otros países realizaron diversos planes, estrategias, programas, proyectos para mitigar el continuo aumento de los GEI. Además, existen infraestructuras verdes, tecnologías de bioenergías, agricultura sostenible entre otras estrategias sostenibles.

### 1.3 Presuposición filosófica

La luz, suelo, agua, aire y otros elementos del ambiente son vitales para el hombre y todos los organismos vivos que se desarrollan en la faz de la tierra. El sol provee la energía física y química necesaria para la vida. La luz es aprovechada, en su mayoría, por las plantas para realizar el proceso de la fotosíntesis, es mediante este proceso donde se captura y almacena el carbono en sus hojas, ramas, tallos y raíces (Aquino et al., 2018).

En el suelo también ocurre una serie de sucesos, el más importante, el CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera es secuestrado. Esta transferencia aporta el incremento del carbono en el suelo el cual favorece la fertilidad de este mismo y contribuye a mitigar la acumulación de GEI; pues todo en este universo, desde la formación de las estrellas hasta la descomposición de la materia a escalas microscópicas, tiene un proceso, un ciclo, un flujo, y todo está perfectamente diseñado.

En este sentido, cuando estudiamos los diversos procesos que se desarrollan en nuestra biosfera vemos que existe una perfecta armonía e interacción entre diversos elementos, componentes o procesos; sin embargo, cuando alteramos alguno de estos procesos (principios) se desencadena una serie de problemas ambientales.

La Biblia también revela conocimiento sobre estos procesos y su perfección, por ejemplo: la biosfera ha sido creada “bueno en gran manera” (Génesis 1:31, 12, 18, 21, 25; Versión Reina Valera 1960) “el aire era puro y saludable”, “todo estaba dispuesto con buen gusto y magnificencia” (White, 2012; pág. 20 y 21), y lo que aún era mejor, increíble y maravilloso, existía una relación directa entre Dios-hombre y hombre-creación. Sin embargo, con la caída del hombre (Adán y Eva) toda la perfección se transformó y se alteró (Génesis 3), aun así después de la caída del hombre, podemos contemplar la perfecta creación, “la visión de la naturaleza, en todo su esplendor, nos provoca sensación de paz y

reverencia” (GRI, 2017; pág. 4 de 30). Y, es más, como al principio (orígenes) todo volverá a ser “bueno en gran manera”, y aún mucho más en el “cielo nuevo y tierra nueva” y en “eternidad” (Salmos 37:29; Daniel 2:44; Apocalipsis 21:1; 22:3-5; Isaías 11:6-9; 65:25; Juan 14:1-3; Juan 3:16).

## **1.4 Objetivos de la investigación**

### **1.4.1 Objetivo general**

- ❖ Determinar el secuestro de dióxido de carbono en el suelo mediante sumideros de carbono: Puyas de Raimondi (*Puya raimondi* Harms), Pajonal con chillihuales y Bofedal, en el distrito de Putina, Puno – 2018.

### **1.4.2 Objetivo específico**

- ❖ Caracterizar los suelos de los sumideros.
- ❖ Comparar el carbono orgánico del suelo y secuestro de dióxido de carbono en el suelo entre sumideros y profundidades.

## **CAPÍTULO II**

### **REVISIÓN DE LA LITERATURA**

#### **2.1 Antecedentes de investigación**

##### **2.1.1 Antecedentes internacionales**

En una investigación en China, realizada por Zhu et al (2015) llevaron a cabo un estudio en tres perfiles de suelo. Y analizaron densidad aparente de cada profundidad usando un contenedor estándar (100 cm<sup>3</sup>). Asimismo, analizaron la concentración de materia orgánica por combustión húmeda con K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>. El objetivo del estudio fue medir las existencias de carbono y los flujos en tres diagramas de bosque templado permanentes (abedul, roble y pino) durante 2011-2014, y se calcularon los cambios de los componentes del ciclo C en relación con las mediciones durante 1992-1994. En los cuales los resultados indicaron que estos ecosistemas forestales templados montañosos en Beijing tienen un gran potencial como sumideros de carbono.

En Polonia Central, llevados a cabo por Błońska & Lasota (2017) estudiaron la acumulación de materia orgánica del suelo y fracciones de carbono a lo largo de un gradiente de humedad de los suelos forestales. El objetivo del estudio fue presentar efectos de las propiedades del suelo, especialmente la humedad, sobre la cantidad y calidad de la materia

orgánica del suelo. El stock del COS midieron sobre la base de su contenido total y también el índice de distribución de carbono (IDC) calcularon a partir de la relación de la acumulación de carbono en los horizontes orgánicos y la cantidad de acumulación de carbono orgánico en los horizontes minerales. Las profundidades de muestreo en el perfil del suelo fue de la siguiente manera: 80-100 cm, 40-50 cm y 0-30 cm. Los autores concluyen que la humedad es un factor importante en la acumulación de carbono orgánico en el suelo.

Montes et al (2016) realizaron un estudio en Colombia sobre la estimación del COS a diferentes profundidades y uso del suelo en el páramo de Sumapaz, Cundinamarca – Colombia, en el cual, el objetivo de la investigación fue determinar el secuestro de carbono orgánico del suelo a tres profundidades bajo dos tipos de uso del suelo, los resultados mostraron que el mayor secuestro de carbono se dio en vegetación natural y a profundidad de 0 a 25 cm con un valor de 188 tC/ha, no obstante, otros resultados mostraron bajos valores a los obtenidos.

Costa et al, (2018) realizaron un estudio sobre materia orgánica del suelo y flujos de CO<sub>2</sub> en pequeñas cuencas tropicales bajo bosques y sistemas agroforestales de cacao. Con el objetivo de observar la influencia espacial de la descomposición de las hojarascas en los primeros centímetros del suelo para el flujo de CO<sub>2</sub> y para describir el procesamiento de la materia orgánica en todo el perfil del suelo. Para ello las muestras de suelo fueron recogidas a profundidades de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm.

Los investigadores concluyen que no encontraron diferencias significativas, sin embargo el flujo de CO<sub>2</sub> fue influenciado por la descomposición de las hojarascas, las características del suelo atribuidos al tipo de cobertura y manejo de la vegetación altamente. Sin embargo, es necesario mencionar que los parámetros de temperatura y humedad mostraron una fuerte relación con el control de la liberación de CO<sub>2</sub>.

### **2.1.2 Antecedentes nacionales**

Apolinario & Carmen (2015) realizaron una investigación en el bosque de *Puya raimondii* Harms–Titankayoc en Ayacucho, con el objetivo de determinar el almacenamiento y flujo de carbono del bosque, para ello utilizaron la metodología semidestructiva, aplicando tras la estratificación según densidad de masa y estado de desarrollo; los investigadores concluyeron que ambas influyen en el carbono almacenado. A nivel de componentes del suelo y las plantas destacan con 72.55 % y 25.07 % del carbono total almacenado respectivamente. Los investigadores finalmente afirman que, el aporte del estudio consiste, en la información científica base generada del bosque de Puya de Raimondii, el cual es fundamental para conocer el potencial de este ecosistema y otros de similares condiciones como sumidero de carbono.

Se investigó también en la jurisdicción de los distritos de San Antonio y Chilca, provincia de Cañete, departamento de Lima, realizado por Palomino (2007) sobre la estimación del servicio ambiental de captura del CO<sub>2</sub> en la flora de los humedales de Puerto Viejo. Uno de los objetivos específicos de la investigación fue determinar la cantidad de carbono almacenado en la estructura vegetal de las especies a fin de estimar el potencial de captura del CO<sub>2</sub>. En la investigación también tomaron muestras de suelo de cada especie de flora estudiada de los humedales. La profundidad fue de 0-20 cm. Determinaron el porcentaje de materia orgánica, porcentaje de carbono y densidad aparente: Con el cual estimaron el COS y CO<sub>2</sub> en t/ha.

### **2.1.3 Antecedentes locales**

Flores (2017) realizó un estudio sobre captura de CO<sub>2</sub> en la "Chillihua" (*Festuca dolichophylla* Presl) de los Pastizales del CIP Illpa Puno, la investigación fue llevado a cabo en el distrito de Paucarcolla a una altitud de 3850 m.s.n.m. Para el cual los tratamientos

evaluados fueron tres (grande, mediano y pequeño) y los componentes (hoja, tallos y raíces) de la Chillihua. La estimación fue realizada para dos sitios de pastoreo 7.70 t CO<sub>2</sub>/ha y 10.78 t CO<sub>2</sub>/ha. Sin embargo, esta estimación fue llevado a cabo en la biomasa de la chillihua, en la cual, el mayor contenido se encontró en el tallo, seguido por las hojas y finalmente en las raíces.

Maquera (2017) realizó un estudio sobre la determinación del contenido de carbono por especie forestal en el bosque del CIP Camacani - UNA - Puno por titulación. Ubicado en el distrito de Platería. La estimación se hizo en la producción de biomasa en los rodales de eucaliptos, ciprés y pino. La mayor captura de carbono en la biomasa aérea del bosque del CIP – Camacani tuvo el eucalipto con 1 260,55 tC seguido por el pino con 489,48 tC y ciprés con 320.25 tC.

Sullca (2018) hizo un estudio sobre la determinación de la captura de carbono en suelos forestales de queñual (*Polulepis sp.*) en la región de Puno. Su investigación demostró que el queñual puede capturar, en promedio, un total de 137.98 tC/ha (505.93 tCO<sub>2</sub>) y 50.85 tC/ha (186.45 tCO<sub>2</sub>) las pasturas.

Otro estudio realizado por Hanco (2018) sobre la determinación de la captura de carbono en suelos con eucalipto (*Eucalyptus globulus Labil*) en el distrito de Huancané-Puno, indica que las pasturas llegan a capturar, en promedio, 38.73 tC/ha (142.01 tCO<sub>2</sub>) y el Eucalipto 37.21 tC/ha (136.44 tCO<sub>2</sub>).

Enriquez (2018) en su trabajo “determinación de captura de carbono en suelos de un sistema agroforestal con café (*Coffea arábica*) en el Valle Esquilaya – Región Puno” evidencia que las pasturas pueden llegar a capturar, en promedio, 38.3 tC/ha (140.3 tCO<sub>2</sub>) y 108.6 tC/ha (398.20 tCO<sub>2</sub>) el sistema agroforestal de café.

## **2.2 Revisión de la literatura**

### **2.2.1 Cambio climático**

El CC, según la Conversión Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), se refiere a un cambio en el estado de clima en un largo periodo de tiempo y el cual involucra a las actividades humanas como principales causantes. Asimismo, la IPCC (2018) indica que “cambio climático”, se refiere a todo cambio en el clima, el cual se debe por intervención antropogénica o eventos naturales. La acepción que toman es la primera.

En consecuencia, habrá escases de agua, afección de ecosistemas en cadena, inundaciones, sequías, efectos sobre la salud, mal nutrición y contaminación atmosférica (Galán, 2009). Aunque los escenarios exactos todavía carecen de certeza, son de esperar serios efectos negativos “también hay la posibilidad de algunos positivos” por lo que es esencial adoptar un cierto número de medidas para reducir los GEI y para incrementar su captura y secuestro en la biomasa y/o los suelos (FAO, 2012).

### **2.2.2 Efecto invernadero**

Los GEI son gases de la atmósfera que absorben y emiten radiación dentro del rango infrarrojo (IPCC, 2018). Dicho de otro modo, las ondas de luz (400-800 nm) atraviesan la capa de ozono y llegan a la superficie de la tierra, una parte es reflejada para retornar nuevamente al espacio, pero el resto de la radiación se queda en la tierra debido a la presencia de estos gases (J. Martínez, Fernández, & Osnaya, 2014).

Cabe resaltar que el efecto invernadero es un proceso natural en el planeta tierra y vital para desarrollo de la vida.

#### **2.2.2.1 Gases de efecto invernadero**

Los principales causantes del CC son los conocidos gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y vapor de agua). Dentro de este grupo el CO<sub>2</sub> es quien sobresale por el

volumen de emisiones que se producen. No obstante, cabe resaltar que el potencial de calentamiento global del CH<sub>4</sub> y del N<sub>2</sub>O es 21 y 310 veces más alto que el CO<sub>2</sub>, los cuales contribuyen al calentamiento global de la tierra (Burbano, 2018).

### 2.2.2.1.1 Dióxido de carbono

Es un gas que constituye aproximadamente el 0.04% de la atmósfera. Su función es regular la temperatura de la superficie de la tierra mediante el efecto invernadero.

El CO<sub>2</sub> llega a la atmósfera por la acción de los organismos vivos de la tierra y el océano, y en menor medida por la descomposición de elementos orgánicos y la quema de combustibles fósiles.

Gracias a la fotosíntesis este gas es absorbido por la biósfera y los océanos; por esta razón el CO<sub>2</sub> se ha mantenido en equilibrio y en cantidades reducidas. Sin embargo, investigaciones recientes demuestran que su concentración aumenta cada año por razones antrópicas (IPCC, 2014), lo que puede conducir, por ser un gas invernadero, a la modificación del balance de radiación en la tierra y a un cambio global del clima.

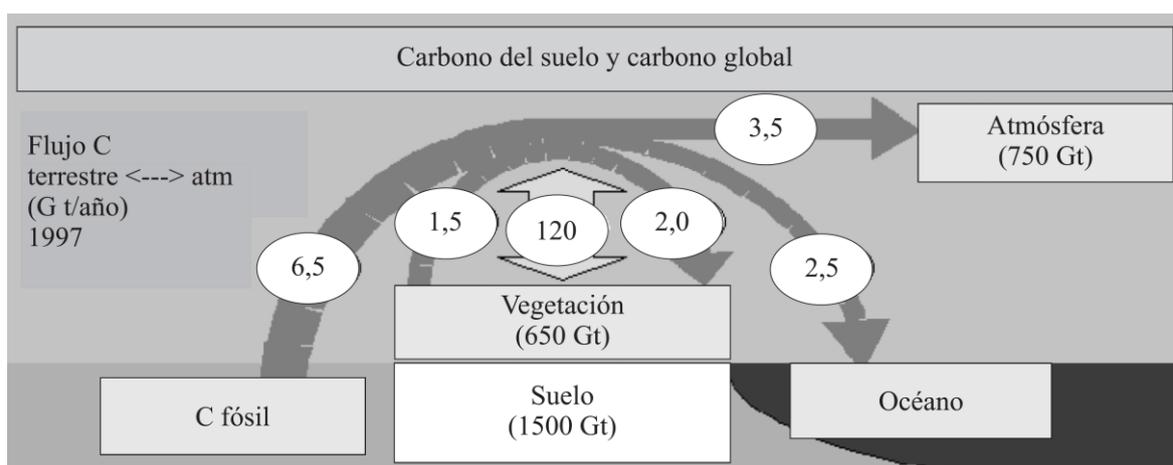


Figura 1. Ciclo terrestre de carbono, carbono del suelo y el carbono global disponible  
Fuente: FAO (2002).

### 2.2.3 Secuestro de dióxido de carbono

Según la IPCC (2014) “es el proceso de aumento del contenido de carbono en un depósito o stock que no sea la atmósfera”. Para Aguinaco (2008) consiste en “eliminar el carbono presente en la atmósfera mediante procesos naturales; tales como, el crecimiento de sumideros biológicos (bosques, suelo, etc)”.

Desde un enfoque biológico incluye el secuestro directo de dióxido de carbono de la atmósfera mediante un cambio en el uso de las tierras, forestación, reforestación, y otras prácticas que mejoran el carbono en los suelos agrícolas. Desde un enfoque físico incluye la separación y eliminación del dióxido de carbono generados de la combustión de combustibles fósiles para producir fracciones con un alto contenido de hidrógeno y CO<sub>2</sub> y el almacenamiento a largo plazo bajo tierra en depósitos de gas y petróleo, minas de carbón y acuíferos salinos.

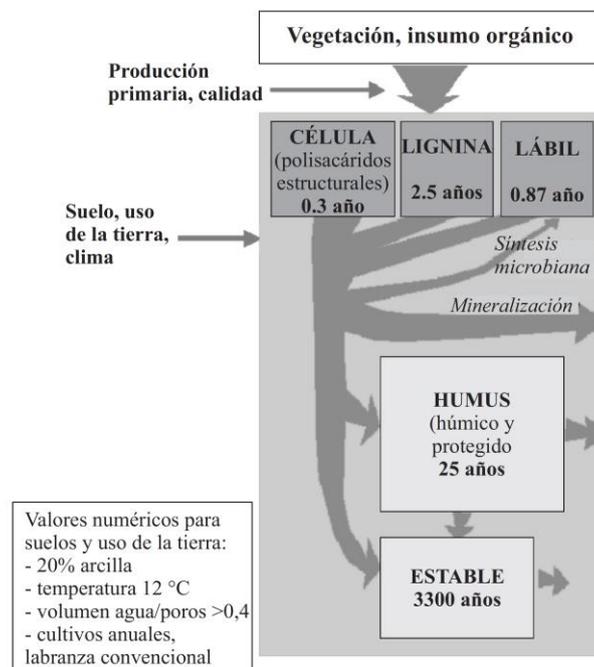


Figura 2. Modelo de la dinámica del carbono en el suelo  
Fuente: Adaptado de Balesdent et al (2000) en la FAO (2002).



Figura 3. Secuestro de carbono, suelo como depósito de carbono  
Fuente: FAO (2017).

#### 2.2.4 Carbono orgánico del suelo

El COS “es el carbono que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de cualquier material producido por organismos vivos” (FAO, 2001). Constituye un componente importante en el ciclo global del carbono, llegando a ocupar el 69.8 % del C orgánico de la biosfera. Estudios, han demostrado que el suelo puede actuar como fuente o reservorio de C, no obstante, dependerá de su uso y manejo (Lal et al., 1990; Lal, 1997; FAO, 2001; Martínez et al., 2008).

Es el principal elemento que forma parte de la MOS es por ello que comúnmente ambos términos son confundidos. Cabe señalar, que los métodos analíticos determinan COS (calcinación húmeda o seca) y, por otro lado, la MOS se estima a partir del COS multiplicando por factores empíricos como el de Van Benmelen equivalente 1.724 (Jackson, 1964; Martínez et al., 2008). El factor de transformación de COS a MOS puede variar entre 1.9 para suelos superficiales y 2.5 para subsuelos (Broadbent, 1953; Martínez et al., 2008).

Los valores más elevados de COS bajo vegetación natural se deben a la mayor protección de la superficie del suelo propiciada por el tipo de cobertura y las fracciones de COS disminuyen a medida que la profundidad del suelo aumenta (Castañeda & Montes, 2017). El potencial del suelo puede representar como una fuente o sumidero de CO<sub>2</sub>,

dependerá de la relación entre el uso de la tierra, tiempo, temperatura, humedad del suelo, la gestión y química y atributos físicos del suelo (Costa et al (2018)).

A nivel mundial, las reservas de COS más grandes se encuentran en zonas críticas como humedales y turberas, la mayoría de los cuales ocurren en regiones de permafrost y en los trópicos (Gougoulias et al., 2014; Köchy et al., 2015; FAO, 2017) como se muestra en Figura 4.

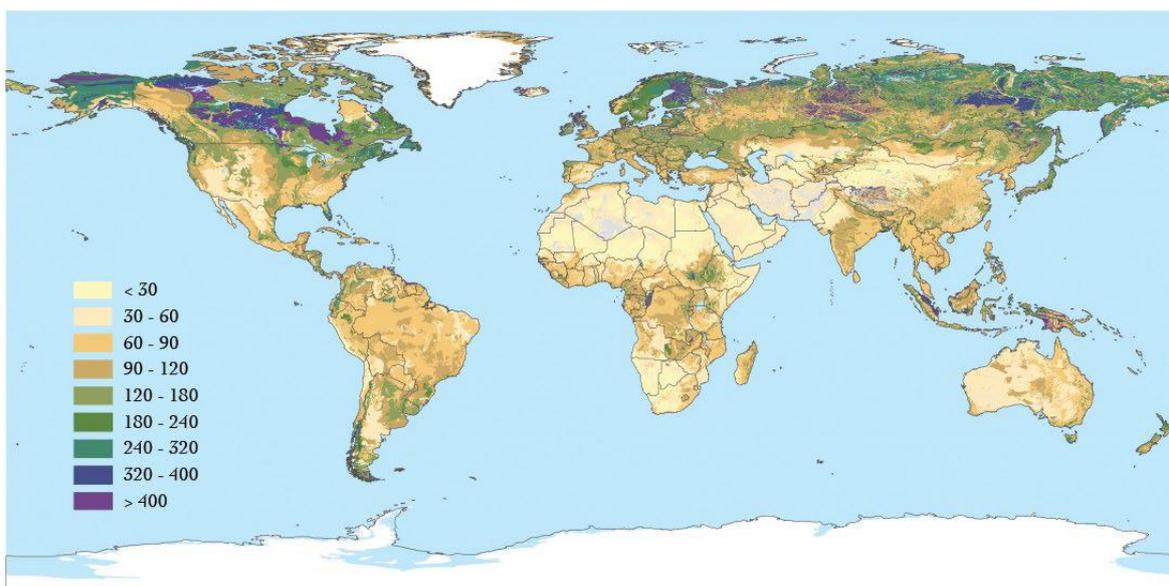


Figura 4. Mapa del contenido de COS a un metro de profundidad (t C/ha)  
Fuente: Batjes (2016); FAO (2017).

### 2.2.5 Ciclo del carbono

El ciclo de carbono es un ciclo biogeoquímico donde el carbono es sometido a distintas transformaciones a lo largo del tiempo. Precisamente es este ciclo lo que permite la regulación del clima en el planeta. Este elemento está depositado en el sistema global en diferentes formas (Bernavidez, 2007):

- a) **Atmósfera:** Como dióxido de carbono, metano y otros componentes.
- b) **Hidrosfera:** En forma de dióxido de carbono disuelto en el agua.
- c) **Litósfera:** En las rocas.
- d) **Antropósfera:** En diferentes formas en los objetos creados por la sociedad.

### **2.2.5.1 Ciclo biológico:**

En esta etapa el dióxido de carbono es intercambiado entre los seres vivos y la atmósfera. El carbono es asimilado por organismos autótrofos, luego es incorporado a las cadenas alimenticias a través del proceso de síntesis, produciendo una gran cantidad de compuestos orgánicos (polimerización de hidratos de carbono) (Chacho, 2019).

A través de la respiración el C es devuelto a la atmósfera en forma de dióxido de carbono.

#### **2.2.5.1.1 Fotosíntesis**

Es el proceso mediante el cual las plantas absorben el carbono de la atmósfera ( $\text{CO}_2$ ) para producir carbohidratos, emitiendo oxígeno en el proceso (IPCC, 2014). Por supuesto, nada de ello sucedería sin la intervención de la luz solar.

Todo organismo heterótrofo necesita una fuente de energía externa para asegurar y conservar su existencia, esto lo hacen mediante la asimilación de organismos autótrofos, por ejemplo, las plantas (Mateus, 2015; López et al., 2016).

El proceso de la fotosíntesis se realiza mediante dos fases: Lumínica y oscura. La diferencia básica entre ambas está en la necesidad de la utilización de la luz solar. La fase lumínica o también llamada, fase fotoquímica o reacción de Hill, es la primera etapa de la fotosíntesis, es sumamente primordial y esto se lleva a cabo con la intervención directa de la luz o energía solar; el cual consiste en la obtención de la energía química en forma de ATP y NADPH, energía que posteriormente, durante la fase oscura, será utilizada para reducir el carbono y sintetizar glúcidos (azúcares básicos) (López et. al, 2018)

Por otro lado, el proceso de la fotosíntesis no solo suministra el alimento para organismos heterótrofos, más gracias a la increíble capacidad que tiene para absorber el  $\text{CO}_2$

atmosférico, una fracción de dicho carbono llega al suelo y éste, independientemente del lugar, puede llegar a estabilizarse por periodos muy largos que pueden ser siglos (Burbano, 2018). En resumen, la fotosíntesis es la producción de glucosa, a partir de la energía solar, el agua y el dióxido de carbono (Figura 5), y se resume en esta ecuación sencilla (Brack & Mendiola, 2000; Stephen, 2002):

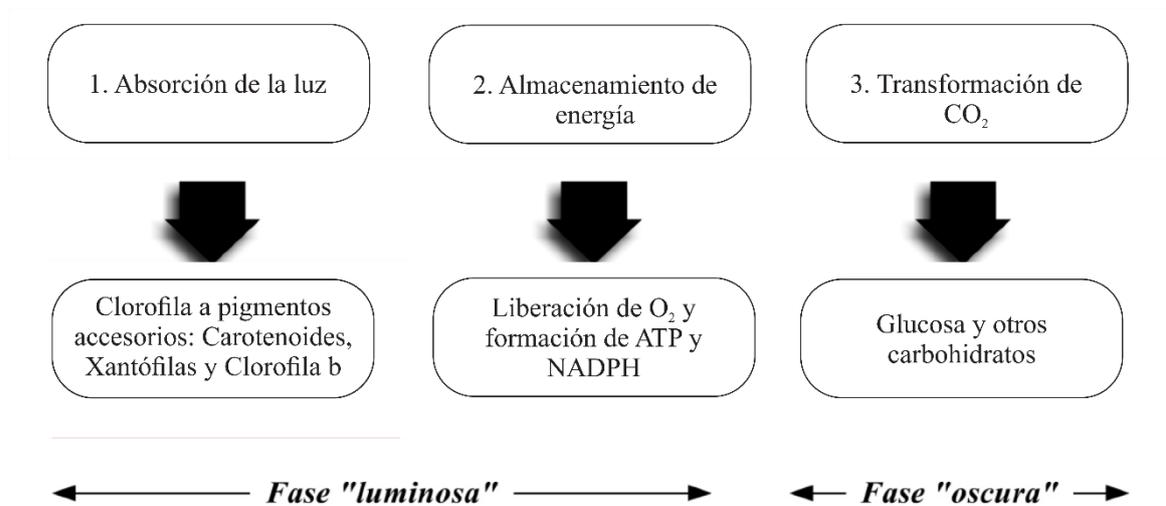
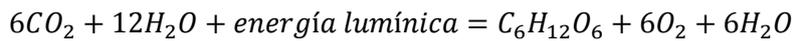


Figura 5. Proceso de la fotosíntesis, fase lumínica y oscura  
Fuente: Adaptado de Hurtado (2016).

### 2.2.5.1.2 Ciclo biogeoquímico

“Regula la transferencia de carbono entre la atmósfera, la litósfera y la hidrósfera” (Bernavidez, 2007). Los océanos capturan el CO<sub>2</sub> en grandes cantidades mediante varios procesos, por ejemplo, la transformación en carbonatos de calcio. Estos finalmente se depositan en el fondo del mar cuando el fitoplancton es descompuesto.

El CO<sub>2</sub> retorna a la atmosfera cuando hay erupciones volcánicas tras la fusión de las rocas que lo contienen.

### 2.2.6 Suelo

El suelo es un “material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad” (MINAM, 2014).

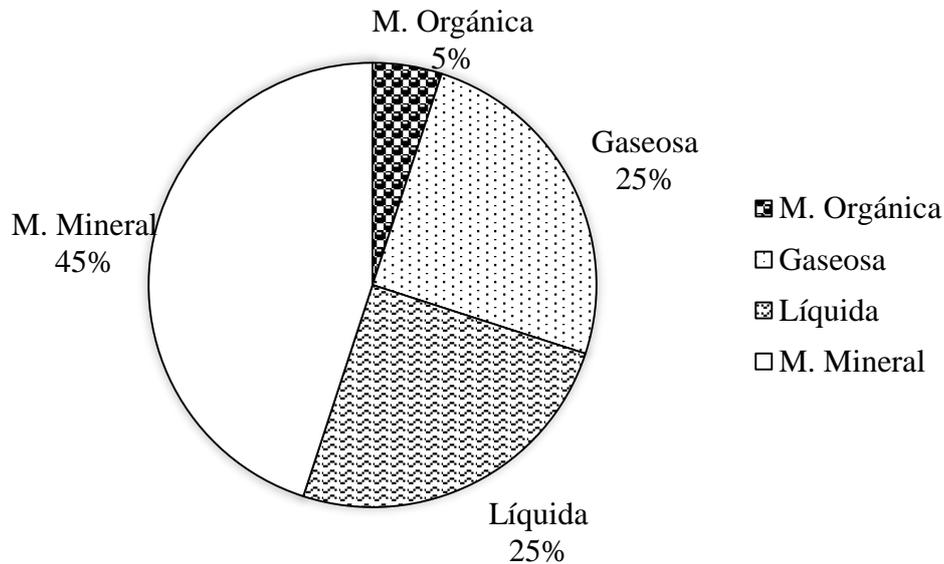


Figura 6. Composición por volumen de un suelo de textura media  
Fuente: Adaptado de Ramírez (1997).

Según la FAO (2017) el suelo se ha convertido en uno de los recursos más vulnerables del mundo frente al cambio climático, la degradación de la tierra y la pérdida de biodiversidad. El suelo es una importante reserva de carbono (Figura 4), conteniendo más carbono que la atmósfera y la vegetación terrestre (ver Anexo K) en conjunto.

Los factores formadores de suelo, como son el clima y los organismos actúan sobre el material parental, en un relieve determinado y a través del tiempo (Ramírez, 1997). La formación de los vegetales (FV) es dependiente de las condiciones meteorológicas (temperatura y precipitación), y de los tipos de suelo. Algunas FV como pajonales, césped de puna, bofedales, vegetación sobre pedregales (Rozbrojová et al., 2010; Rashid et al., 2011; Yaranga et al., 2018), son FV característicos de los ecosistemas andinos (ver Anexo L).

## 2.2.7 Propiedades del suelo

### 2.2.7.1 Parámetros físicos

**Color.** – Es una de los parámetros que tiene relación directa con la temperatura, la dinámica de los elementos y movilidad del agua en el suelo, el contenido de materia orgánica, la cantidad de organismos, la evolución de los suelos etc. A simple vista se pueden deducir diferentes procesos y fenómenos que han ocurrido en el suelo a través del tiempo y en épocas actuales (Ramírez, 1997).

**Densidad aparente.** – Es la relación existente entre la masa y el volumen de suelo. Este parámetro nos ayuda a conocer las condiciones de la compactación, la porosidad, la disponibilidad de agua y oxígeno, etc. Existe una relación inversamente proporcional entre la densidad aparente y la porosidad, es decir, a medida que aumenta la densidad disminuye la porosidad según Duchaufour (1965) citado por Ramírez (1997).

La DA es el factor más importante para estimar las reservas de COS y el principal responsable de las variaciones entre estimaciones (FAO, 2007).

**Potencial de hidrógeno.** – El pH es un parámetro físico-químico más importante del suelo, ya que de él depende la disponibilidad de nutrientes para las plantas, determinando su solubilidad y la actividad de los microorganismos, los cuales mineralizan la materia orgánica. También determina la concentración de iones tóxicos, la CIC, la fertilidad del suelo y diversas propiedades importantes (Ramírez, 1997). Los suelos muy ácidos (<5,5) tienden presentar cantidades elevadas y tóxicas de aluminio y manganeso. Los suelos muy alcalinos (>8,5) tienden a dispersarse y presentan cantidades elevadas de sodio (FAO, 2019).

**Textura.** – Es la distribución de las partículas del suelo, expresada en porcentaje. Esta característica influye en la velocidad de infiltración de agua (Ramírez, 1997).

#### 2.2.7.2 Parámetros químicos

**Materia orgánica del suelo.** – La MOS es la fracción de la biosfera incorporada en la pedosfera. En sus componentes se halla toda la materia muerta de origen eucariota y procariota, y sus productos metabólicos orgánicos. Por lo general, los suelos poseen cerca del 5% de materia orgánica, en forma coloidal y en partículas (Burbano, 2018).

La materia orgánica en el suelo es el resultado del equilibrio entre la entrada de carbono (foliar y restos de raíces) y salidas ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  exportación y la escorrentía hidrológica). Es una variable clave como indicador. Su cantidad y calidad determina el número y la actividad de la biota del suelo (FAO, 2017).

**Capacidad de intercambio catiónico.** – Es el parámetro más importante dentro de los procesos del suelo. El cambio iónico es debido casi en su totalidad a la fracción arcilla y la materia orgánica. La capacidad de intercambio catiónico es una medida de cantidad de cargas negativas presentes en las superficies minerales y compuestos orgánicos del suelo (arcilla, materia orgánica o sustancias húmicas) y representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener (Ca, Mg, Na, K,  $\text{NH}_4$ , etc.) y se expresa en meq/100g de suelo (FAO, 2019). Aumentos en el pH traen distintas consecuencias: incremento en las cargas negativas, precipitación del aluminio y la disminución de concentración de hidrogeniones. Lo cual significa que a valores altos de CIC existe una gran disponibilidad de los diferentes elementos en el suelo (Ramírez, 1997).

**Calcio, Magnesio y Potasio.** – Estos elementos aumentan su solubilidad cuando el pH está en un rango de 7 a 8.5. En suelos ácidos, la CIC disminuye y, por lo tanto, aumenta la posibilidad de que estos elementos sean lavados del perfil (Ramírez, 1997).

**Fósforo.** – Si el pH es ácido, la solubilidad del aluminio y del hierro es alta. Estos compuestos precipitan con el fósforo como compuestos insolubles. En pH alcalino, es decir, superior a 7.5, el calcio aumenta su solubilidad y reacciona con los fosfatos precipitándolos y formando compuestos insolubles como la apatita; por lo tanto, el fósforo presenta su mayor disponibilidad con pH entre 6.5 y 7.5, siendo en ese rango donde se presenta la mayor mineralización de compuestos de fósforo orgánico y mineral (Ramírez, 1997).

**Saturación de bases.** – Un incremento en el pH, a valores cercanos a 7, da como resultado mayor solubilidad para los diferentes elementos, por lo que provoca un mayor porcentaje de saturación de bases (Ramírez, 1997).

**Nutrientes de las plantas.** – La cantidad de nutrientes presente en el suelo determina su potencial para alimentar organismos vivos. Los 16 nutrientes esenciales para el desarrollo y crecimiento de las plantas se suelen clasificar entre macro y micro nutrientes dependiendo de su requerimiento para el desarrollo de las plantas. Los macronutrientes se requieren en grandes cantidades e incluyen Carbono(C), Hidrógeno (H), Nitrógeno(N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Azufre(S). Los micronutrientes por otro lado se requieren en pequeñas, su insuficiencia puede dar lugar a carencia y su exceso a toxicidad, se refieren a Hierro (Fe), Zinc (Zn), Manganeseo (Mn), Boro (B), Cobre (Cu), Molibdeno (Mo), Cloro (Cl) (FAO, 2019).

**Carbono orgánico del suelo.** – El COS representa cerca de los dos tercios del C fijado en los ecosistemas terrestres con un valor aproximado de 1 500 Pg C (Burbano, 2018).

El secuestro de COS es el proceso mediante el cual el carbono se fija desde la atmósfera a través de plantas o residuos orgánicos y se almacena en el suelo. Cuando se trata de CO<sub>2</sub>, el secuestro de COS comprende tres etapas: 1) la extracción del CO<sub>2</sub> de la atmósfera a través de la fotosíntesis de las plantas; 2) la transferencia de carbono del CO<sub>2</sub> a la biomasa vegetal; y 3) la transferencia de carbono de la biomasa vegetal al suelo donde se almacena en forma de COS en la reserva más lábil (FAO, 2017).

**Nitrógeno.** – La disponibilidad de este elemento depende de la mineralización de la materia orgánica por parte de los microorganismos. Esta mineralización se da en valores cercanos a pH 7, que donde mayor desarrollo presenta las bacterias encargadas de la mineralización y fijación de nitrógeno (Ramírez, 1997).

**Salinización del suelo.** – Se refiere a la acumulación de sales solubles en agua en el suelo. La salinización elevada en el suelo lleva a la degradación de los suelos y la vegetación. Las sales más comunes se encuentran en combinaciones de los cationes de sodio, calcio, de magnesio y de potasio con los aniones de cloro, sulfato y carbonatos (FAO, 2019).

**Alcalinidad del suelo.** – La alcalinización, o salinidad del suelo, se define como el exceso de sodio intercambiable en el suelo. A medida que su concentración incrementa en el suelo empieza a reemplazar otros cationes. Los suelos sódicos se frecuentan en regiones áridas y semiáridas y se encuentran muchas veces inestables con propiedades físicas y químicas muy pobres (FAO, 2019).

**Contenido de carbonato de calcio.** – El carbonato de calcio,  $\text{CaCO}_3$ , es una sal poco soluble que se encuentra naturalmente en varias formas y en varios grados de concentración en el suelo. Su presencia juega un papel fundamental en la estructura del suelo si se encuentra en concentraciones moderadas. Se utiliza como enmienda para neutralizar el pH de suelos ácidos y para suministrar el nivel de Calcio (Ca) para la nutrición de las plantas. Estos componentes son difíciles de asimilar por las plantas llevando a su acumulación. Cantidades excesivas de calcio puede por ello restringir la disponibilidad de fósforo, boro y hierro para las plantas (FAO, 2019).

### **2.2.7.3 Propiedades biológicas**

La biología del suelo es la ciencia que se ocupa del estudio de los organismos. Estos actúan sobre el suelo modificando su composición, su estructura y su funcionamiento. Los microorganismos se clasifican según su tamaño (ver Tabla 2).

#### **2.2.7.3.1 Organismos del suelo**

En el suelo existen una diversidad de organismos vivos, estos organismos interactúan entre sí y la estructura radicular, formando una red de actividad biológica (Orgiazzi et al., 2016; FAO, 2017). Contribuyen en gran medida a la formación de la MOS a partir de la descomposición de desechos orgánicos. Por otro lado, “la estructura de la comunidad microbiana del suelo está influenciada en gran parte por la calidad y cantidad de COS, y en menor medida por la diversidad de las plantas” (Thiele-Brunh et al., 2012; FAO, 2017) (ver Figura 5).

A continuación, se presenta principales procesos biológicos de algunos elementos en el suelo: nitrógeno y fósforo.

### 2.2.7.3.2 Proceso biológico del fósforo

Para el elemento fósforo, los microorganismos no necesitan de ninguna especialización ya que solubilizan el fósforo de compuestos orgánicos insolubles, excretan ácidos orgánicos (láctico, cítrico, oxálico, etc.) los cuales actúan sobre estos compuestos dejándolos disponibles para la planta; también los microorganismos oxidan amonio o azufre, formando ácido nítrico o ácido sulfúrico, los cuales liberan los iones fosfato de la roca fosfórica.

También se presenta simbiosis entre las raíces de las plantas y algunos hongos. Estos son denominados micorrizas, y pueden ser de dos clases: endomicorrizas (cuando las hifas penetran al interior de las raíces) y ectomicorrizas (si las hifas se adhieren a la superficie de las raíces), en esta simbiosis los hongos dejan asimilable el fósforo para la planta y ésta a su vez les da el alimento que ellos necesitan. Por medio de las micorrizas, las plantas pueden obtener hasta el 50% del fósforo que requieren.

Los compuestos fosfatados también son incorporados en las células de los microorganismos, lo que se denomina inmovilización. Este fósforo es devuelto al suelo cuando el organismo muere (Ramírez, 1997).

### 2.2.7.3.3 Proceso biológico del nitrógeno

En la dinámica del elemento nitrógeno, participan un gran número de microorganismos en diferentes fases:

**Mineralización.** – Este es la transformación biológica de los compuestos orgánicos a compuestos inorgánicos como  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{NO}_3$  el cual consta de tres etapas: (1) aminización (es la producción de aminas y aminoácidos simples a partir de proteínas y otros compuestos nitrogenados por parte de microorganismos); (2) amonificación (Se obtiene el amoniaco a partir de las aminas y los aminoácidos

simples resultantes en el proceso anterior. Dentro de los microorganismos involucrados en este proceso están: bacterias como bacillus, clostridium y pseudomonas; hongos como aspergillus y actinomicetos); (3) nitrificación (En este proceso el amoniaco es transformado a nitratos, mediante oxidación. Consta de dos etapas: en la primera, el  $\text{NH}_4$  es transformado a  $\text{NO}_2$  e intervienen las nitrosomonas, hongos como *Aspergillus* y *Penicillum*, actinomicetos como *Nocardia* y Streptomices; en la segunda, el  $\text{NO}_2$  pasa a  $\text{NO}_3$  con intervención de las bacterias nitrobacter) (Ramírez, 1997).

**Desnitrificación.** – Es el proceso inverso de la nitrificación, en la cual los nitratos son utilizados por los microorganismos como fuente de oxígeno en medios inundados, que posteriormente pasan a la atmósfera como  $\text{N}_2$ , es decir, se presenta una pérdida de nitrógeno del suelo por volatilización. En este proceso participan Pseudomonas, Achromobacter, Bacillus, Alcaligenes, Agrobacterium, Azospirillum, Flavobacterium, Halobacterium, Hipomicrobium, Rhizobium y Micrococcus, entre otros (Ramírez, 1997).

**Fijación biológica.** – El nitrógeno atmosférico es tomado por los microorganismos e incorporado en sus estructuras, y luego será liberado al suelo y aprovechado por las plantas. Existen dos tipos de fijación: la simbiótica (en la cual se da una asociación benéfica entre la planta y la bacteria. La asociación más conocida se da entre las leguminosas y las bacterias del género Rhizobium) y la asimbiótica (en la cual algunas bacterias y algas verde-azules asimilan nitrógeno atmosférico y lo transforman en compuestos orgánicos, que son liberados al suelo posteriormente cuando el organismo muere) (Ramírez, 1997).

#### 2.2.7.3.4 Proceso biológico del azufre

Al igual que el nitrógeno, los residuos orgánicos son depositados en el suelo y posteriormente empiezan la acción de los microorganismos, los cuales descomponen estos materiales e incorporan al suelo los compuestos azufrados.

Las condiciones de aireación son factores importantes que determinan la dinámica de este elemento en el suelo. Cuando existen suelos bien aireados, actúan los microorganismos aerobios obteniéndose como resultado los sulfatos como ion libre, que es absorbido fácilmente por las plantas.

Si el medio es reducido, los microorganismos anaerobios son los que participan en la descomposición de la materia orgánica. Se presentan varias etapas, las cuales se dan a continuación. Mineralización (en este proceso actúan los microorganismos anaerobios y aerobios, dependiendo de las condiciones de humedad del suelo. Los sulfatos se obtienen como producto final en los procesos aerobios, donde intervienen las bacterias del género *Thiobacillus*; cuando existe intervención de las bacterias anaerobias, el producto final es sulfuro y H<sub>2</sub>S), inmovilización (Los microorganismos incorporan los compuestos en sus estructuras y luego al morir son devueltos de nuevo al suelo, quedando disponibles para la planta).

La oxidación y reducción de azufre consiste en: primero el compuesto azufre es oxidado en medios bien aireados, para ser transformados en sulfatos (en este proceso participan las bacterias del género *Thiobacillus thiooxidans*, *T. novellus*, *T. thioferus*, *T. denitrificans*) y segundo los sulfatos que se encuentran en forma disponible son reducidos hasta transformarse en azufre elemental, el cual se pierde por volatilización hacia la atmósfera (Ramírez, 1997).

## 2.2.8 Sumideros de carbono

Según la IPCC (2014) es todo proceso o mecanismo que remueve de la atmósfera un gas de efecto invernadero, un aerosol o un precursor. Un reservorio dado, puede ser un sumidero de carbono atmosférico, si durante un intervalo de tiempo, es mayor la cantidad de carbono que afluye a él que la que sale de él.

La convención marco de naciones unidas sobre cambio climático define el concepto de “sumidero” como: “cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe un gas de efecto invernadero, un aerosol, o un precursor de gas de efecto invernadero de la atmosfera”.

Los sumideros de carbono son cruciales para la reducción de la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico para mitigar el calentamiento global (Gu et al., 2018).

### 2.2.8.1 Puya de raimondi

Puya de Raimondi (*Puya raimondii* Harms) (PRH) es una especie endémica de los andes de Perú y Bolivia, distribuida en poblaciones conocidas como rodales entre los 3500 y 4800 m de altitud ( Raimondi, 1874; Rivera, 1985; Venero & Hosting, 1986; Brako & Zarucchi, 1993; Vadillo, 2011; Aquino et al., 2019). Está considerada como una riqueza natural con gran potencial ecoturístico, por su belleza que sobresale de las especies con las que comparte el mismo hábitat (Hartmann, 1981; Rivera, 1985; Aquino et al., 2019). Los rodales de PRH con mayor desarrollo poblacional muestran preferencia por terrenos rocosos con pendientes moderados a muy fuertes, exposición al noroeste y donde la radiación solar sea mayor (Villegger, 1981, Rivera, 1985; Aquino et al., 2019). La vegetación comúnmente asociada a estos rodales contrasta por su porte herbáceo y arbustivo (Rivera, 1985) (Compuesta principalmente por especies de los géneros: *Stipa*, *Festuca*, *Calamagrostis*, *Poa*, *Baccharis*, *Gentiana*, *Lupinus*, *Culcitium*, *Chuquiraga*, *Senecio*, *Tafalla*, *Perezia*, *Werneria*, *Opuntia* y *Puya* (Villiger, 1981; Rivera, 1985). PRH se distribuyen en zonas de bosque

húmedo montano y páramo muy húmedo tropical (3200 a 4800 m.s.n.m.) (Pereda, 2016; Hermitaño, 2018). Un aspecto principal a considerar es el de los factores de temperatura y precipitación, los cuales tienen una relación directa con el área ya que a medida que se va incrementando estas variables resulta el crecimiento de las áreas de los escenarios de la PRH, de acuerdo con (la investigación de escenarios de PRH en relación con los factores meteorológicos) (Hermitaño, 2018).

A continuación, se presenta la clasificación taxonómica de Puyas de Raimondi (*Puya raimondii* Harms) (Wettstein, 1994; Choquecahua, 2013).

Tabla 1

*Clasificación taxonómica de Puya de Raimondi*

Taxonomía de las Puya de Raimondi	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Subclase	Commelinidae
Orden	Poales
Familia	Bromeliaceae
Subfamilia	Pitcairnioideae
Género	Puya
Especie	<i>Puya raimondii</i> Harms
Nombre común	Puya de raimondii, titanka, puya

Fuente: Adaptado de Wettstein (1994)

En el departamento de Puno se determinaron las áreas de las PRH en cuatro distritos: Ayaviri 411.4 ha, Putina 388.9 ha, Lampa 189.7 ha, Asillo 63.9 ha aproximadamente (Flores, 2012; Canaza, 2018). Sin embargo, existen otras áreas de PRH sin el levantamiento de información. La distribución de PRH en el departamento de Puno está por Melgar (Nuñoa), San Antonio de Putina (Putina – Bellavista – Caserío de Villa Candelaria Churura), Lampa (Palca), Azángaro (Muñani), Huancané (Huatasani) (Goyzueta, 1999; Apaza, 2005; Choquecahua, 2013). PRH proporciona un valor estético y científico (Lipa, 2017).

### **2.2.8.2 Pajonal con chillihuales**

Los pajonales con chillihuales (PC) son formaciones vegetales de ecosistemas andinos. PC debido a la predominancia de la familia Cyperaceae (*Festuca dolichophylla*). Los pajonales presentan gran número de géneros y especies (Poaceae, rosaceae, asteraceae, apiaceae, cyperaceae, juncaceae, entre otros) (Yaranga et al., 2018). Los pajonales se desarrollan en suelos húmedos (Lattera et al., 1998). La especie *Festuca rigescens* tiene una característica importante debido a que crece en un tipo de suelo rizosférico en vegetación de tipo pajonal y las *F. rigescens* pertenecen a la familia Poaceae (Santillana & Toro, 2018).

### **2.2.8.3 Bofedal**

Los bofedales tienen altos contenidos de materia orgánica, por tanto, una gran capacidad de retención de agua (Hofstede & Aguirre, 1999; Suárez et al., 2016), la captura del carbono y el desarrollo de una vegetación rica, el cual constituye principal fuente de sustento en épocas de estiaje para la fauna silvestre y la ganadería (Mamani et al., 2016). Los bofedales alto-andinos constituyen ecosistemas con áreas dispersas y discontinuas y son semi-acuáticos clasificados dentro de los humedales según el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (2012) citado por (Meneses et al., 2014). Los bofedales altoandinos están conformado principalmente por plantas en cojin que pertenecen a la familia de *Juncaceae* (Ostria 1987, Ruthsatz 2012, Squeo et al., 2010; Meneses et al., 2014) y estos producen hasta 3 cm de turba y materia orgánica al año, generando poco a poco suelos orgánicos de varios metros de profundidad (Benavides et al., 2013; Gould et al., 2010; Meneses et al., 2014). Uno de los problemas principales de este ecosistema es el retroceso glaciar que tiene efectos negativos sobre la diversidad y productividad de los bofedales, además se reduciría la disponibilidad de agua (Baraer et al., 2019; Meneses et al., 2014). Son ecosistemas muy vulnerables al cambio climático, por ejemplo, la sequía, puede afectar la función y distribución (Farnha et al., 1996; Ramsar Irán, 2006; IPCC, 2012; Aponte et al., 2017).

La estructura de bofedales a grandes rasgos está compuesto por cobertura vegetal de especies rastreras, cojín en planta, turba, arcilla:

**Cobertura o especies rastreras (Cojín en planta).** – En la cobertura vegetal de los bofedales pueden estar presente la familia *Apiceae*, *Asteracea* y otros depende del tipo de bofedal. En los bofedales se pueden observar flora predominante como: *Distichia muscoides*, *Alchemilla diplophylla*, *Aciachne acicularis*, *Azorella diapenzoides* y *Festuca rigescens* con una regular a buena cobertura vegetal (Carrasco, 2019) (Mamani, 2016).

**Turba.** – Es la fracción del suelo sin consolidar formado por materia vegetal fibrosa, parcialmente descompuesta que se acumula en un ambiente anegado. La formación de la turba en los bofedales contribuye como sumidero de carbono importante en el suelo (Hernández, 2010; Suárez et al, 2016) y a largo plazo (estabilidad) (Kurniatum et al., 2011; Burbano, 2018).

**Arcilla.** – La arcilla es una fracción mineral del suelo. Existe una interacción entre la arcilla y los materiales orgánicos, en ello se genera la estabilización, por ende, se mantiene el secuestrado el carbono. “Mediante la estabilización físico-química de la materia orgánica con partículas arcilla se evita la acelerada descomposición y se mantiene capturado el carbono” (Robert, 1996; Suárez et al., 2016) por otro lado, Labrador (2012) citado por Burbano (2018) afirma “los compuestos orgánicos interactúan con la fracción mineral del suelo, especialmente con la arcilla”.

Los ecosistemas de bofedales brindan múltiples servicios ambientales y funciones ecosistémicos (ver Anexo M) aparte del secuestro de C, como se mencionó también son vulnerables frente al cambio climático por lo cual requiere una gestión y aprovechamiento sostenible (ver Anexo M, sobre algunas opciones basados en el manejo de tierra).

Tabla 2

*Visión general de los principales organismos del suelo según su tamaño*

<b>Tamaño</b>	<b>Microfauna</b> <i>(Rango de tamaño: 1-100 <math>\mu</math>m)</i>	<b>Mesofauna</b> <i>(Rango de tamaño: 100 <math>\mu</math>m - 2 mm)</i>	<b>Megafauna</b> <i>(Rango de tamaño: &lt; 2 mm)</i>
+	Protozoos	Colémbolos	Lombrices
	Nemátodos	Ácaros	Hormigas
	Hongos	Tardígrados	Cochinillas
-	Bacterias		Termitas

Fuente: Adaptado de Orgiazzi et al. (2016); Gardi y Jeffery (2009); FAO (2017)

## 2.3 Métodos de estimación de CO<sub>2</sub>

### 2.3.1 Métodos para estimar carbono en el suelo

Determinar el carbono orgánico en el suelo con alta precisión es esencial para cuantificar el secuestro de carbono (Castañeda & Montes, 2017). Por ello, se han desarrollado métodos ex-situ e in-situ según Chatterjee et al (2009) citado en Castañeda & Montes (2017). Los métodos ex-situ involucran coleccionar muestras representativas de suelo para medir la concentración de carbono mediante técnicas de combustión seca o húmica. Los métodos in-situ determinan alta precisión sin ocupar mucho tiempo en el procesamiento y análisis de muestras, los cuales son basados en sensores remotos y mediciones espectroscópicas en campo.

### 2.3.2 Protocolo de muestreo

El protocolo de muestreo de suelo en el Perú se basa en la “guía de muestreo de suelos en el marco del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo” elaborado por la Dirección General de Calidad Ambiental (MINAM, 2014).

A nivel mundial también existe una guía para la evaluación de la calidad y la salud suelo, elaborado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica (USDA, 1999).

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 **Ámbito de estudio**

##### 3.1.1 **Ubicación**

El área de investigación se encuentra en la comunidad de Bellavista que se ubica en las coordenadas UTM 402142 Este y 8353694 Norte del distrito de Putina, provincia San Antonio de Putina, departamento Puno. La comunidad de Bellavista está ubicado al noroeste de la ciudad de Putina a 3941 msnm (ver Figura 7).

##### 3.1.2 **Delimitación del área de estudio**

La delimitación política, ubicación del lugar de estudio y los puntos de muestreo se presentan en las Tablas 3, 4 y 5. La escala de medición determinada fue local, debido a que el área de estudio seleccionado es el único lugar que tiene un potencial de estudiar a tres sumideros de carbono: Puyas de Raimondi (*Puya Raimondii* Harms), Pajonal con Chillihuares y Bofedal. Con uso de suelo relativamente uniforme. Las dimensiones determinadas son de 3 ha (aprox.) y con un radio de 15,000 m (aprox.).

El periodo de muestreo fue en época seca (mes octubre).

Tabla 3

*Delimitación política del lugar de estudio*

Delimitación política	
Departamento	Puno
Provincia	San Antonio de Putina
Distrito	Putina
Comunidad	Bellavista

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4

*Coordenadas UTM del lugar de estudio*

Lugar de estudio	Coordenadas UTM (WGS84)		
	Este	Norte	Altura
Comunidad de Bellavista	402142	8353694	3941

Fuente: Elaboración propia

### **3.1.3 Determinación de los puntos de muestreo**

Se consideraron los puntos de muestreo y la ubicación de acuerdo a investigaciones y estudios relacionados al secuestro de carbono en el suelo y algunas criterios del protocolo de muestreo del MINAM (2014), USDA (1999) e IPCC (2005). Se consideró el flujo del carbono y/o el ciclo del carbono, la homogeneidad de la superficie de muestreo y la interacción de las especies *Puya de Raimondi* (*Puya raimondi* Harms), Pajonal con chillihuales y Bofedal con otras especies.

Tabla 5

Coordenadas UTM de los puntos de muestreo de la zona de estudio

Coordenadas UTM (WGS84)			
	Este	Norte	Zona
PRH 1 (s1)	401123	8353408	4132
PRH 2 (s1)	401115	8353384	4149
PRH 3 (s1)	401086	8353332	4159
PC 1 (s2)	401386	8353449	4103
PC 2 (s2)	401369	8353490	4100
PC 3 (s2)	401331	8353538	4091
B 1 (s3)	400889	8353262	4170
B 3 (s3)	400976	8353386	4137
B 3 (s3)	401002	8353430	4119

Fuente: Elaboración propia

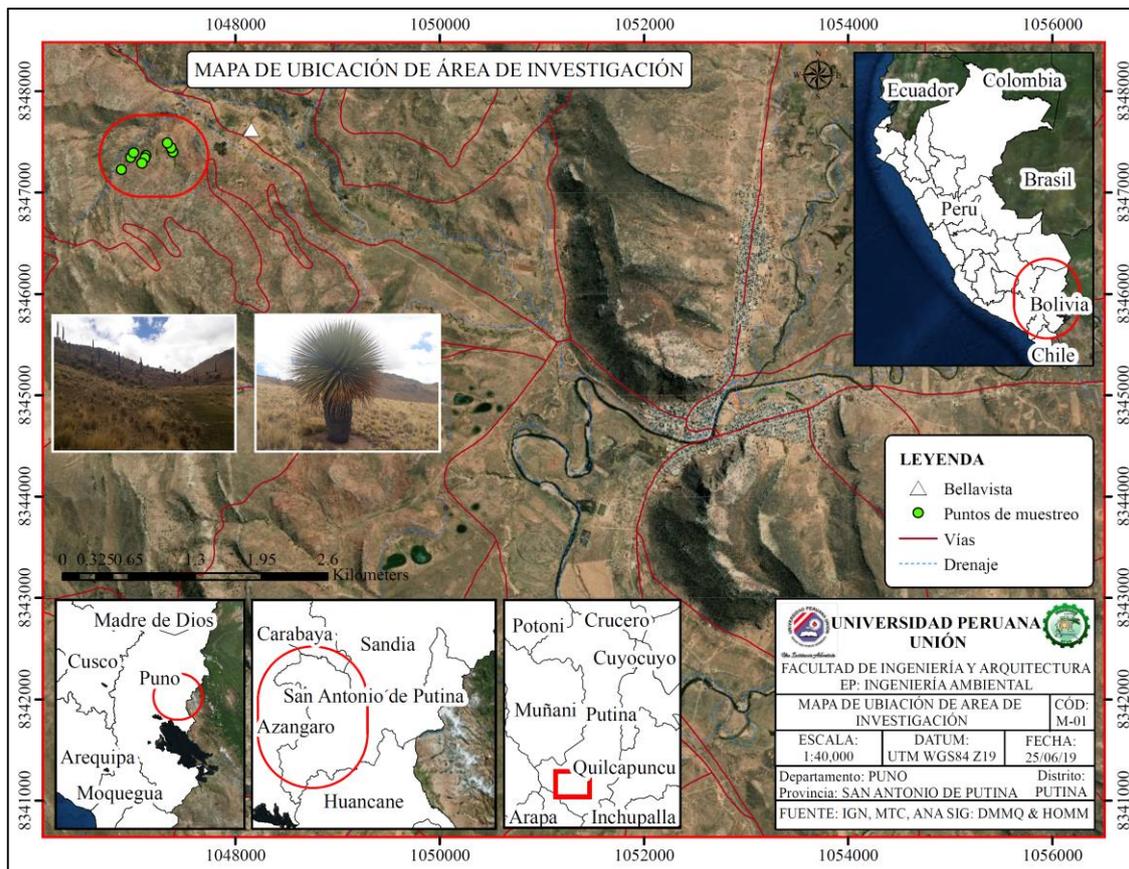


Figura 7. Mapa de ubicación del área de estudio.

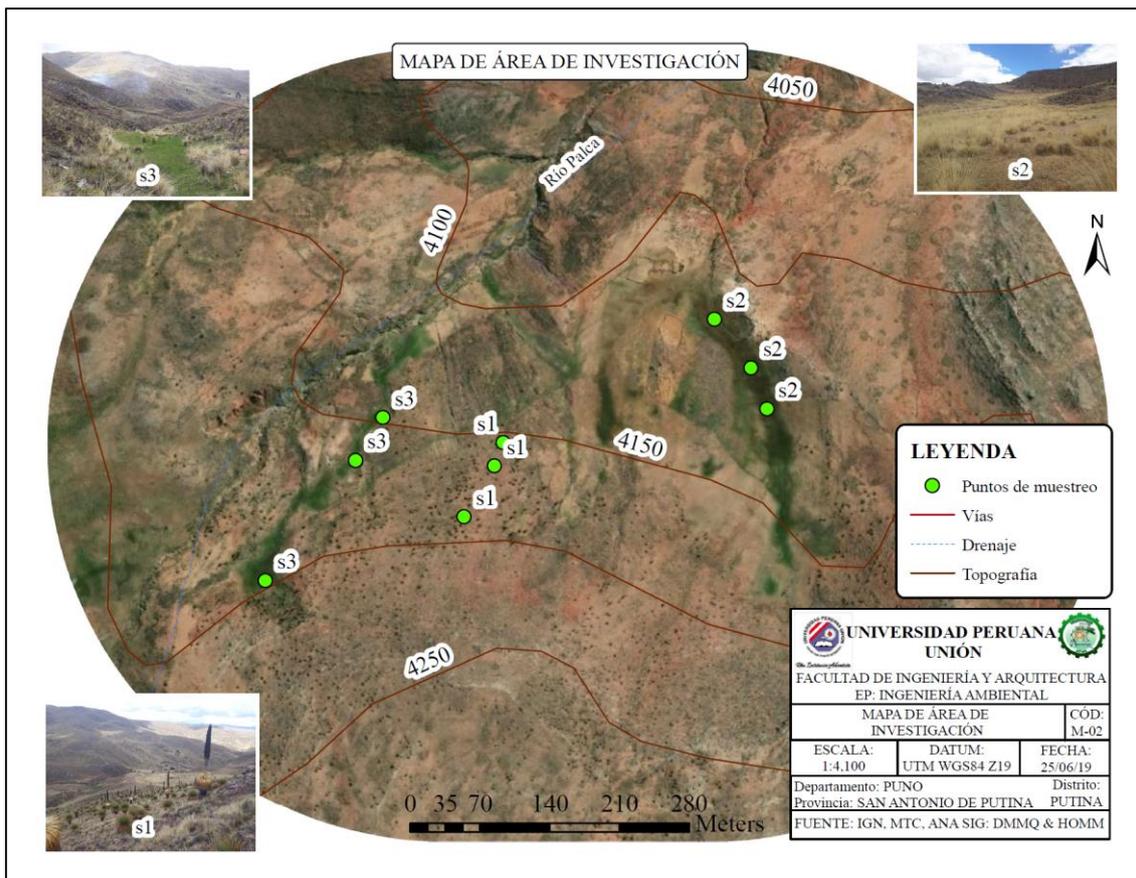


Figura 8. Mapa del área de investigación y puntos de muestreo de los sumideros.

### 3.1.4 Características climatológicas

Según el mapa de clasificación climática del Perú-SENAMHI el área de estudio se encuentra en “zona de clima semiseco, frío, con deficiencias de lluvias en otoño e invierno, con humedad relativa calificada como seca – C(o,i) C’ H3”. Según el SIGRID (Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres) con base de datos del SENAMHI, la temperatura máxima proyectada al 2030 es de 16 °C y la temperatura mínima al 2030 es de -6 °C y la precipitación multianual al 2030 es de 700 mm. En la Figura 9 se presenta la temperatura máxima y mínima media mensual para el distrito de Putina.

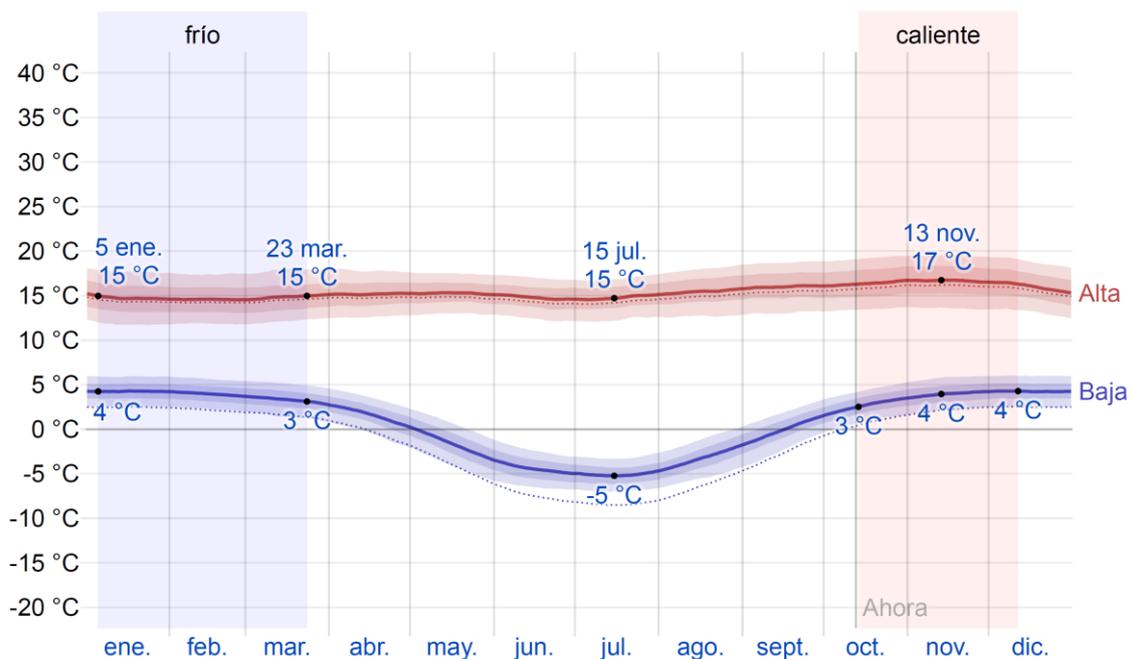


Figura 9. Temperatura máxima y mínima promedio mensual  
Fuente: Weather-Spark (2019).

### 3.1.5 Selección de los parámetros a evaluar

Existen diferentes métodos de estimación del secuestro de carbono en el suelo ya sean directos e indirectos, es decir in-situ o ex-situ. Sin embargo, en la presente investigación se determinó mediante los resultados del porcentaje de materia orgánica (Kalra & Maynard, 1991). Además, se realizó el análisis de fertilidad del suelo (Anguiano et al., 2013) debido a que COS está relacionado con los nutrientes del suelo, para lo cual se evaluó los siguientes parámetros: Materia Orgánica (MO), nitrógeno (N), carbono orgánico (CO), fósforo (P), potasio (K), conductividad eléctrica (CE), potencial de hidrógeno (pH), y  $Al^{+3}+H^{+}$ , en tres estratos de profundidad (0-10 cm, 10-30 cm y 30-60 cm) y finalmente la densidad aparente (Da).

### 3.1.6 Geología

Según el SIGRID (Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres) con base de datos de INGEMMET. El área de estudio se ubica en la formación Muñani – areniscas cuarzofeldespáticas intercaladas, con código de la denominación

genética V-2 areniscas y lutitas, y corresponde a la unidad litológica rocas sedimentarias (ver Tabla 6).

Tabla 6

*Columna estratigráfica del área de estudio*

Columna estratigráfica					
Unidades estratigráficas de tiempo			Unidades litoestratigráficas		
Era	Sistema	Serie	Nombre	Símbolo	Titología
Mesozoico	Cretaceo	Superior	Fm. Muñani	K-mñ	Arenisca de grano grueso de color anaranjado, limo arcillitas

Fuente: Adaptado de Tupa (2017)

### 3.2 Diseño y tipo de investigación

#### 3.2.1 Enfoque

La presente investigación es de tipo cuantitativo, pues se analizaron datos numéricos en la estimación y comparación del secuestro de dióxido de carbono en suelos de sumideros.

#### 3.2.2 Diseño

La investigación es no experimental descriptivo transversal.

### 3.3 Materiales y equipos

En la Tabla 7 se muestran los materiales de gabinete, campo y equipos utilizados.

Tabla 7

*Materiales utilizados durante en la ejecución de la investigación*

Gabinete	Campo	Laboratorio	Equipos
Laptop	Pala	Balanza mecánica	GPS gamín
Cuaderno de apuntes	Espátula Grill Acodada	Recipiente metálico	Celular
Útiles de escritorio	Flexómetro	Estufa	(cámara)
	Cooler		
	Bolsa Zip		
	Cilindro metálico		
	Cuaderno de apuntes		
	Equipos de protección personal		

Fuente: Elaboración propia

### **3.4 Procedimiento**

#### **3.4.1 Muestreo de suelos**

El muestreo de suelos se desarrolló en forma aleatoria según la guía USDA (1999); MINAM (2014); Montes et al. (2016); Zhu et al. (2015); Bečvářová et al (2018); Cillis et al. (2018). Se consideró una profundidad de 0-10, 10-30 y 30-60 cm (tratando en lo posible que los puntos de muestreo se ubiquen a la misma altura) con tres repeticiones para cada sumidero de 1 ha. Se extrajo 1 kg por estrato. Obteniendo en total 27 muestras.

Las muestras fueron codificadas y enviadas al Laboratorio para sus respectivos análisis (Ver Anexos A y B)

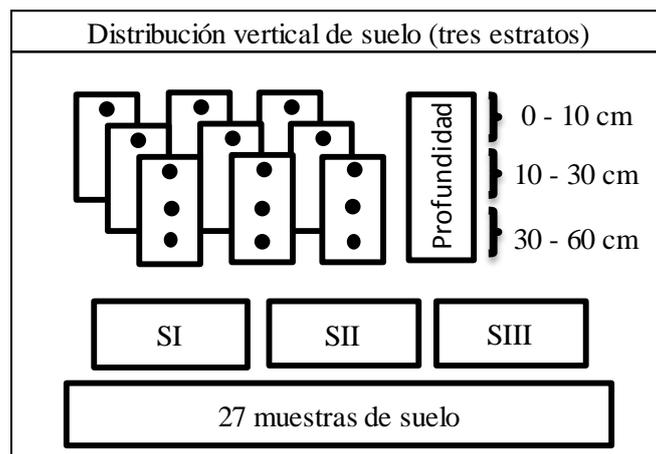


Figura 10. Esquema y diseño de muestreo de suelo.

### 3.4.2 Análisis de los parámetros físico-químicos

El análisis físico-químico se realizó en los laboratorios del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) y la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). En la Tabla 8 se muestra las metodologías de los parámetros analizados.

Tabla 8

#### Metodología de análisis de los parámetros

Parámetro	Unidad	Metodología	Laboratorio
Densidad aparente	(g/cm <sup>3</sup> )	Método del cilindro de metal (Volumen conocido)	INIA
pH	-	Medición el potenciómetro de la suspensión de suelo: agua en relación 1:1	UNALM
Conductividad eléctrica	dS/m	Medición del contenido de sales solubles del extracto acuoso en la relación suelo: agua o en el extracto de la pasta de saturación.	UNALM
Materia Orgánica	%	Método de Walkley y Black, oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio.	UNALM
Fósforo disponible	ppm	Método de Olsen modificado, extracción con NaHCO <sub>3</sub> 0.5N, pH 8.5	UNALM
Potasio	ppm	Extracción con acetato de amonio y lectura por espectrofotometría de absorción atómica	UNALM
Cationes de Al <sup>3+</sup> + H <sup>+</sup>	meq/100	Método de Yuan, extracción con KCl 1N	UNALM
Nitrógeno	%	Johan Kjeldahl	UNALM
Carbono orgánico	%	Método de Walkley y Black, oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio (Ecuación).	UNALM

Fuente: UNALM

### 3.4.3 Metodología para la estimación del secuestro de carbono

#### 3.4.3.1 Concentración de carbono orgánico (CCO)

La CCO se estimó a partir de la MO (ver Ecuación 1). Metodología de Walkley y Black (1934) citado en Kalra & Maynard (1991). Esta CCO fue obtenida por medio del factor de Van Benmelen 1.724, que se dividió entre el porcentaje de materia orgánica, ya que este componente contiene el 58 % de carbono orgánico (Madrigal et al., 2018).

$$CCO = \frac{MO}{1.724} \quad (1)$$

Donde:

CCO = Concentración de carbono orgánico (%)

MO = Contenido de materia orgánica (%)

1.724 = Factor de conversión

#### 3.4.3.2 Carbono orgánico del suelo en toneladas por hectárea (tC/ha)

Para determinar el contenido de COS en toneladas por hectárea se utilizó la metodología propuesta por Rosenzweig y Hillel (2000) aplicado en otros estudios (González et al., 2008; Castellanos, 2010; Błońska & Lasota, 2017; Becvárová et al, 2018; Madrigal et al., 2018).

$$COS = C * D * P \quad (2)$$

Donde:

COS = Contenido de carbono orgánico del suelo (tC/ha)

C = Concentración de carbono en el suelo (%)

D = Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)

P = Profundidad de suelo (cm).

### 3.4.3.3 Dióxido de carbono en toneladas por hectárea (tCO<sub>2</sub>/ha)

Finalmente, para determinar el secuestro de CO<sub>2</sub> se usó la Ecuación 3 (Palomino, 2007; Flores, 2017).

$$CO_{2sec.} = C * K \quad (3)$$

Donde:

CO<sub>2</sub>sec. = Toneladas de dióxido de carbono secuestrado en el suelo (t CO<sub>2</sub>/ha)

C = Contenido de carbono del suelo (tC/ha)

K = Factor de conversión (44/12)

### 3.5 Flujograma del desarrollo de la investigación

La metodología de la investigación se desarrolló principalmente en cuatro fases (Ver Figura 11)

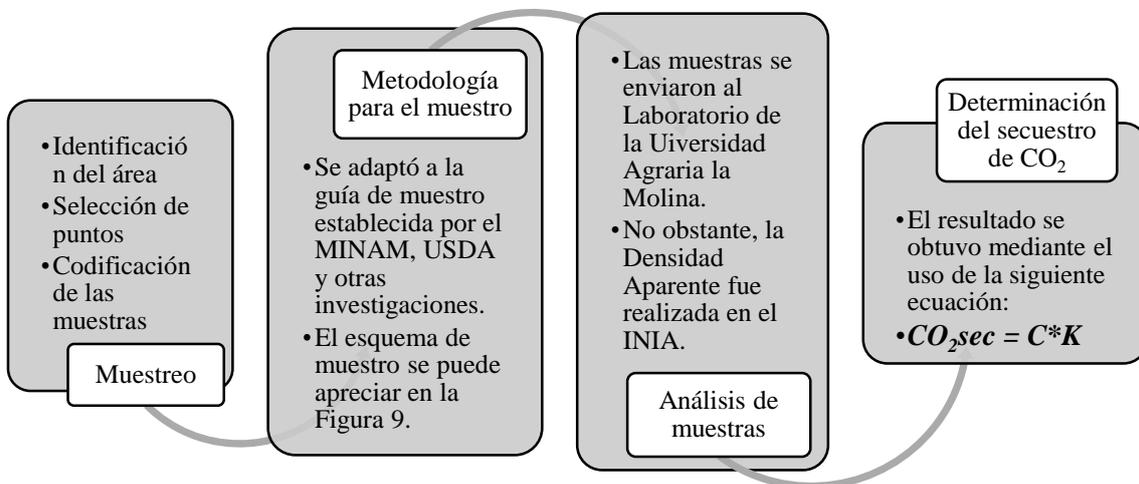


Figura 11. Metodología resumida en el flujograma.

### **3.6 Análisis estadístico**

#### **3.6.1 Arreglo factorial**

El diseño de la investigación es arreglo factorial de 3 x 3, con 9 tratamientos y tres repeticiones por tratamiento, haciendo un total de 27 unidades experimentales; donde los factores en estudio son:

s= Sumideros

- s1 Puyas de Raymondi
- s2 Pajonal con chillihuales
- s3 Bofedal

p= Profundidad

- p1 10 cm.
- p2 20 cm.
- p3 30 cm.

#### **3.6.2 Prueba de hipótesis**

##### **a) Sumideros**

Ho:  $s_1 = s_2 = s_3$

Ha: Existe diferencia entre los sumideros

Alfa= 1%= 0.01

##### **b) Profundidades**

Ho:  $p_1 = p_2 = p_3$

Ha: Existe diferencia entre las profundidades

Alfa= 1%= 0.01

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 4.1 Caracterización de suelo de los sumideros

Las características fisicoquímicas de los suelos, en promedio, se muestran en la Tabla 9. Todos los resultados obtenidos a detalle se aprecian en los Anexos A y B.

##### a) Materia orgánica

El porcentaje de MOS tuvo un promedio de 1.67, 6.27 y 5.25 en s1, s2 y s3 respectivamente; comparados con el Anexo C, los suelos de las Puyas de Raymondi están categorizados como “bajo” en materia orgánica, esto se debe al terreno rocoso en el cual se establecen preferentemente estas especies (Apolinario & Carmen, 2015). Por otro lado, los suelos de Bofedales y Pajonales están clasificados como “alto”. Estos resultados fueron mayores al obtenido por Calvo (2008) en Puno, quien señala que los suelos en esta región presentan valores medios. Sin embargo, se difiere este resultado debido a que el estudio se realizó en una zona donde no hubo intervención humana, es decir, que no eran lugares de cultivo y, principalmente por el color del suelo (marrón oscuro a negro), el cual es un indicador de riqueza en humus de alta calidad (FAO, 2017).

### **b) Densidad aparente**

La densidad aparente tuvo un promedio de 1.00, 0.61 y 0.99 en s1, s2 y s3. Los resultados indican que estos suelos tienen una densidad baja, lo cual significa que tienen un alto contenido de materia orgánica, buena porosidad (>63%) y disponibilidad de agua y oxígeno (Rubio, 2010; Ramírez, 1997). Sin embargo, es necesario mencionar que los valores obtenidos en el s1 tienden a incrementar (alta densidad), esto significa que estos suelos presentan “bajo” contenido de materia orgánica y esto se corrobora con el Anexo C. Por otra parte, el ligero aumento de la Da en el s3 se debe principalmente a la presencia de arcilla en la última capa de muestreo (30-60 cm). Ver Anexo D.

### **c) pH**

Se han obtenido pH de 4.58, 4.63 y 4.84 para los sumideros s1, s2 y s3 respectivamente. El resultado, comparado con el Anexo C, indica que estos suelos son “fuertemente ácidos” y son menores a los que obtuvo Calvo (2008). Sin embargo, cabe mencionar también que Mamani (2016) obtuvo valores de pH en un rango de 3.3 a 6.3 en zonas altoandinas. Por otro lado, Sullca (2018) registró valores de entre 5.09 a 5.13 en suelos de *Pastura* y *Queñual* en la comunidad de Quello Quello, Región Puno. En síntesis, los suelos en la región de Puno pueden variar su pH desde moderada hasta fuertemente ácidos.

### **d) N, P y K**

En general, los resultados de estos parámetros (Ver Anexo A y B) indican que los suelos de los sistemas s1 y s2 presentan bajo contenido en fósforo (<7 ppm), a excepción del s3 (8.14) el cual se debería a la acumulación de fósforo y su escaso aprovechamiento por las plantas, pues este sumidero muestra limitada cantidad de

MO, lo que indica baja disponibilidad y actividad microbiana (Cerón, 2012). Con respecto al K, el contenido es “medio” para los tres sumideros (97.44 – 195.33 ppm) en comparación con el Anexo C y fueron ligeramente inferiores a los obtenidos por Calvo (2008) en Puno, pero superiores a los registrados en Huancavelica. En resumen, la disponibilidad de nutrientes en los tres sistemas estudiados es “bajo” y no es de extrañar pues son característicos de la región de Puno (Mamani, 2016).

Tabla 9

Resumen y comparación de los parámetros del suelo

Investigadores	Sumidero	Tiempo Año	Código	Profundidad	MO %	pH	CE dS/m	Al <sup>3+</sup> +H <sup>+</sup> meq/100	Nitrógeno %	Fósforo ppm	Potasio ppm	Tipo de suelo	Ecosistema
(Autores, 2018)	s1	2018		p1=0-10	2.27	4.47	0.14	0.58	0.09	4.63	285		Rodales de Puya de Raimondi
				p2=10-30	1.67	4.68	0.04	0.5	0.07	7.8	148		
				p3=30-60	1.08	4.58	0.03	0.68	0.06	12	153		
	s2			p1=0-10	8.28	4.66	0.18	0.3	0.26	5.07	196	Leptosol	Pajonal con chillihuales
				p2=10-30	6.34	4.55	0.14	0.42	0.26	3.8	130		
				p3=30-60	4.2	4.68	0.08	0.5	0.21	2.83	133		
	s3			p1=0-10	7.8	4.98	0.2	0.38	0.28	3.3	127		Bofedal
				p2=10-30	6.61	4.82	0.23	0.53	0.22	2.9	85.33		
				p3=30-60	1.33	4.71	0.06	0.53	0.06	2.03	80		
(Blońska & Lasota, 2017)	WT <sub>80-100</sub>	2017	O	p3=80-100	3.85±0.37			306.98±243.27*	12.54±5.28*	58.75±32.41*	0.69±0.24*	Podzols Stagnosols	Zona Reservada (Gradiente de humedad)
				p3=80-100	3.87±0.16			193.96±79.65*	1.75±1.15*	8.67±4.90*	0.05±0.03*		
				p3=80-100	4.51±0.41			95.36±41.21*	0.24±0.07*	61.46±46.18*	0.01±0.01*		
	Húmedo		AG	p2=40-50	4.94±0.73			69.90±9.37*	6.80±3.79*	19.18±12.18*	0.36±0.29*	Gleysols	
				p2=40-50	5.64±0.84			35.45±68.05*	1.84±1.04*	3.85±3.69*	0.06±0.04*		
				p2=40-50	6.85±0.73			4.14±5.25*	0.33±0.18*	1.27±0.72*	0.07±0.05*		
	Pantano		AM	p1=0-30	5.71±0.78			14.99±5.84*	10.09±7.02*	30.70±28.43*	0.34±0.28*	Mollic Gleysols	
				p1=0-30	6.72±0.61			3.76±6.59*	3.31±2.39*	8.86±5.88*	0.10±0.08*		
				p1=0-30	7.30±0.69			4.11±1.01*	0.64±0.51*	5.09±4.47*	0.12±0.07*		
Vegetación Natural	2016			p1=0-25	4.22±0.22			3.63±0.79		8.17±3.6		Páramo andino	
				P2=25-50	4.38±0.17			2.88±0.69		5.17±1.83			
				P3 = >50	4.61±0.16			2.80±0.60		3.16±0.98			
				P1=0-25	4.63±0.40			2.80±0.67		28.8±15.9			
				P2=25-50	4.68±0.44			2.80±0.43		16.8±8.78			
				P3 = >50	4.74±0.47			2.80±0.60		4.80±2.49			
Humedales	2007			J	5.2	6.48	5.09	0		7	189	Bosque de Puya de Raimondi (ACR)	
				S	0.3	8.62	4.5	0		5	153		
				GS	0.6	8.21	10.5	0		38	706		
				T	0.5	6.12	3.67	0		5	70		

Fuente: Elaboración propia. Nota: \*Al, P (mg.kg<sup>-1</sup>); N (g.kg<sup>-1</sup>); K (cmol(+).kg); WT<sub>80-100</sub> (Mesa de agua)

## 4.2 COS y secuestro de CO<sub>2</sub> en sumideros a diferentes profundidades

Los resultados obtenidos se muestran a detalle en el Anexo E. Estos resultados indican la cantidad de carbono secuestrado en el suelo a diferentes profundidades.

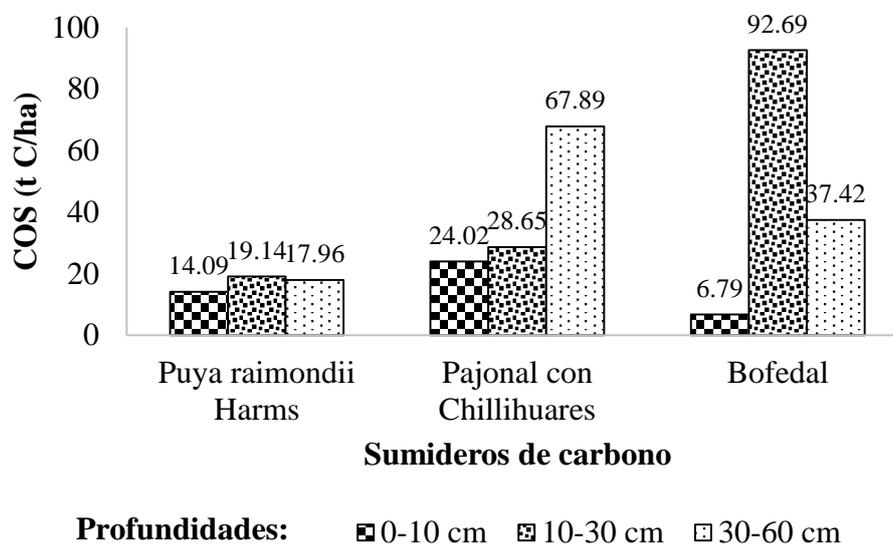


Figura 12. Comparación de la media de COS secuestrado a diferentes profundidades.

La Figura 12 muestra la cantidad total de COS (en promedio) secuestrado en el suelo. El cual indica que hay mayor cantidad en el s3 (Bofedal), siendo más específico, en la segunda capa con un valor de 92.69 tC/ha. Y es seguido por el s2 (Pajonal) con un valor promedio de 67.89 tC/ha en la tercera capa. La distribución vertical de COS de sumideros se observa en la Figura 13.

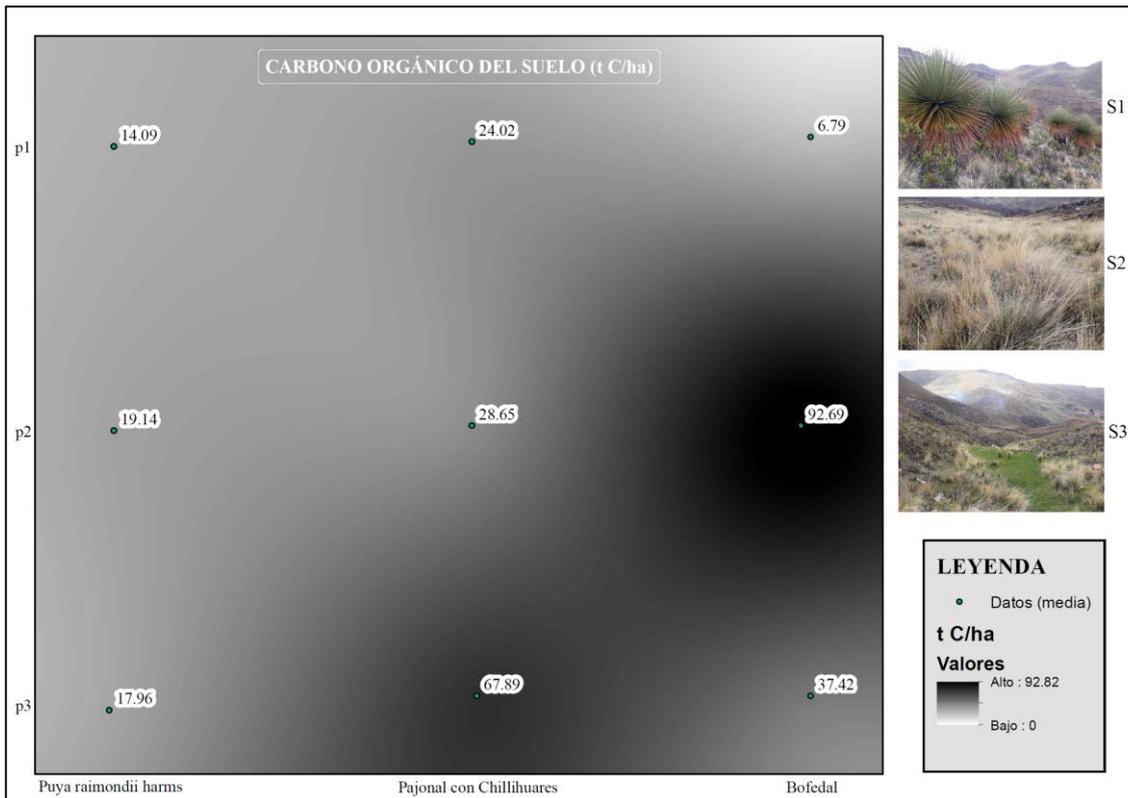


Figura 13. Distribución del COS a diferentes profundidades.

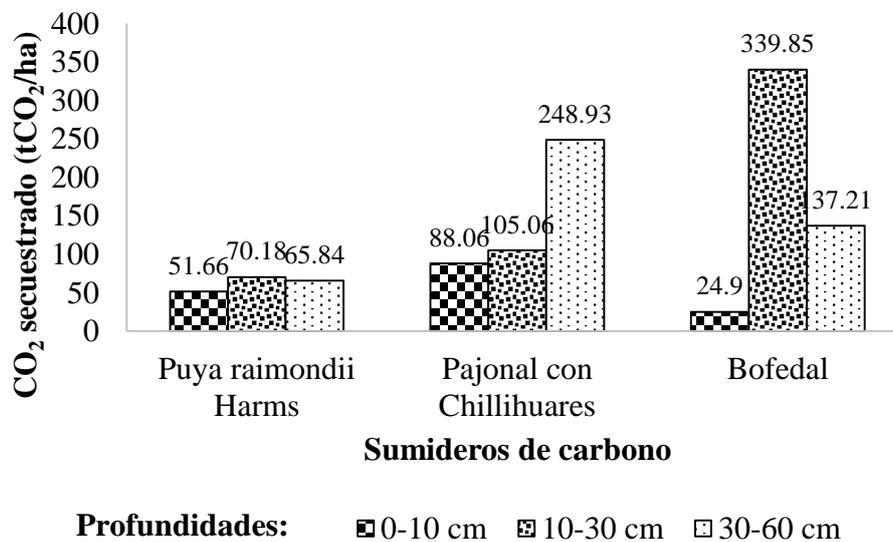


Figura 14. Comparación de media de CO<sub>2</sub> secuestrado a diferentes profundidades.

La Figura 14 evidencia la cantidad de CO<sub>2</sub> retenido en el suelo. El mayor CO<sub>2</sub> secuestrado resultó para los sumideros s3 y s2 con valores de 339.85 y 248.93 tCO<sub>2</sub> respectivamente. La distribución vertical de CO<sub>2</sub> secuestrado se observa en la Figura 15.

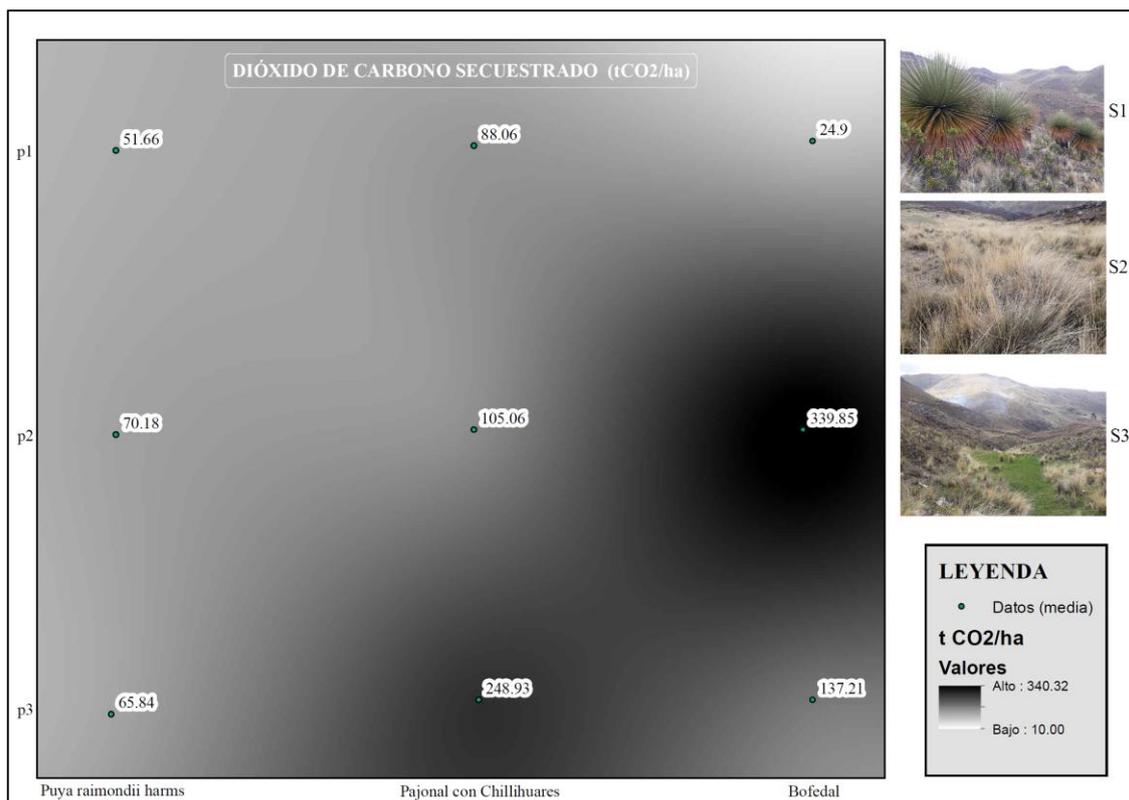


Figura 15. Distribución de CO<sub>2</sub> a diferentes profundidades.

Como se mencionó en líneas anteriores, el CO<sub>2</sub> secuestrado sobresalió en el Bofedal (s3) en comparación a otros sumideros (s2 y s1). Sin embargo, en otros ecosistemas del mundo los resultados mostraron variabilidad con respecto a la presente investigación (Ver Tabla 13). Por ejemplo, en las montañas y bosques templados de China (Pekín), páramo andino (Colombia), zona alpina de pastizales neotropical de jalca (Entre páramo húmedo y puna seca – Cajamarca), bosque de puya de raimondi (Ayacucho), circunlacustre de la laguna Chinchaycocha (Junín), humedales (Lima), bofedal (Arequipa), bosque relicto altoandino de queñual (Ayaviri), turberas (bofedal) (Cajamarca), bosque de *Polylepis* (Junín), páramo-cultivos-pastizales (Ecuador), especies de palmeras (aguajales) (Loreto), y bosque tropical (Panamá) (Zhu et al., 2015; Montes et al., 2016; Apolinario & Carmen, 2015; Palomino, 2007; Yang et al., 2018; Alvis et al., 2018; Sullca, 2018; Fernández, 2019; Guillen & Salome, 2019; Rosero, 2019; Kumar et al., 2018; Jones et al., 2019) estos registros demostraron ser superiores, sin embargo, los resultados

difieren debido a estrato y profundidad evaluado ya que algunos ecosistemas como los bofedales pueden estimarse más cantidades de carbono secuestrado o en algunos casos menores cantidades.

Por otro lado en tierras de cultivo (Venecia – Italia, Shandong – China, Ontario - Canadá) (Cillis et al., 2018) (Li et al., 2018) (Ramnarine et al., 2018), humedales (Lima), pastizales de zona alpina (Cajamarca), pastura – plantaciones de eucalipto – queñual – café – pino (Huancané, Ayaviri, Carabaya y Puno), sistema agroforestal asocio arboreo con pino y aliso (Ecuador), y plantaciones (Ecuador) resultaron iguales e inferiores a la presente investigación (Palomino, 2007; Yang et al., 2018; Hanco, 2018; Enriquez, 2018; Mayta, 2019; Farez, 2019; Rosero, 2019).

Los resultados superiores se deben principalmente a los parámetros meteorológicos (temperatura y precipitación) los cuales repercuten en los procesos edáficos (vegetación – suelo – microorganismos) y/o también en las formaciones vegetales (pajonales, bofedales y vegetación sobre pedregales) y estos están relacionados con la dinámica de la MOS. En ecosistemas de páramos, la acumulación de carbono en el suelo es en gran cantidad y con grados de estabilidad (Hofstede, 1999; Suárez et al., 2016) al igual que en los ecosistemas de bofedales. Mientras que en los ecosistemas de bosques húmedos y tropicales el flujo del carbono es dinámico debido al componente activo (temperatura – humedad – organismos del suelo (ver Tabla 2)) y estos están referidos con baja estabilidad (Si et al., 2018).

Los bajos resultados se deben principalmente a tres factores: (1) condiciones del lugar (ubicación geográfica), (2) parámetros meteorológicos y (3) factores antropogénicos (usos de suelos). El primero está relacionado con los tipos de suelo, cobertura vegetal, la geomorfología (relieve, pendiente). El segundo se debe a las bajas

precipitaciones ya que la cantidad de MOS se reduce y por ende el COS. El tercero, está relacionados con el uso de suelo como tierras de cultivo (Montes et al., 2016; Cillis et al., 2018; Li et al., 2018; Ramnarine et al., 2018;) y tierras de pastoreo (Yang et al., 2018).

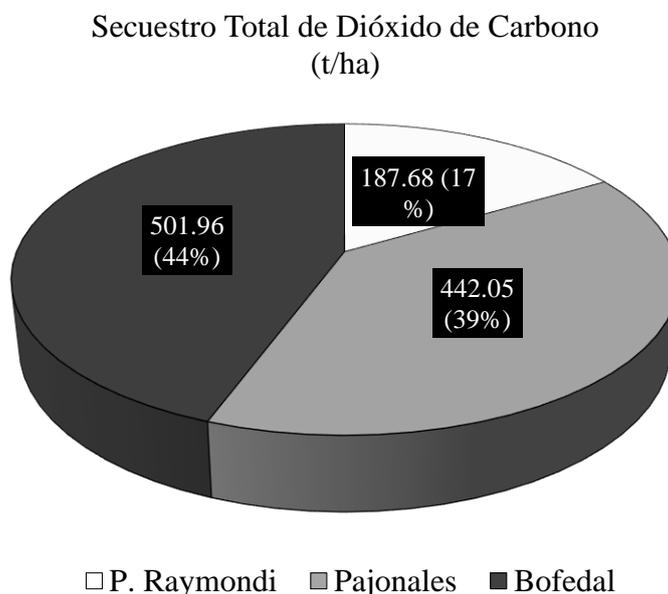


Figura 16. CO<sub>2</sub> total secuestrado a 60 cm de profundidad en los sumideros de Bellavista – Putina, 2018.

En la Figura 16 se observa el potencial de secuestro de carbono de cada sumidero evaluado en la comunidad de Bellavista. El cual nos indica que el Bofedal tiene gran capacidad de secuestrar el dióxido de carbono, mostrando el 44 %, seguido por el Pajonal con Chillihuales con 39 % y finalmente las Puyas de Raimondi con 17 %; estos resultados muestran la cantidad total de CO<sub>2</sub> secuestrados a un espesor de 60 cm de profundidad en el suelo.

Las grandes cantidades de secuestro de carbono en los bofedales están relacionados a la extensión y edad, a la disponibilidad de agua (su fuente principal de agua son los deshielos, aguas superficiales, puquiales y la lluvia (MINAM, 2015; Portal, 2019)). El nivel de humedad y/o permanencia de agua en el bofedal evaluado es “mesicos” (presencia de agua temporal) de acuerdo con Luna (1994) y Portal (2019).

#### 4.2.1 Resultados de la prueba estadística

Tabla 10

*Análisis de varianza del secuestro de CO<sub>2</sub> para sumideros y profundidades.*

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
S: Sumideros	55,691,335	2	27,845,667	5,682	,012
P: Profundidad	69,794,537	2	34,897,268	7,121	,005
S*P	130,502,282	4	32,625,571	6,658	,002
Residuos	88,207,330	18	4,900,407		
Total corregido	344,195,484	26			

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 10 de análisis de varianza con un valor  $p= 0.005$  se observa que existe diferencia significativa entre las medias de CO<sub>2</sub> secuestrado por profundidades a un nivel de significancia  $\alpha= 0.01$  por lo que se rechaza la hipótesis nula de medias y se infiere que a diferentes profundidades el CO<sub>2</sub> es secuestrado de manera independiente y significativa.

Por otro lado, del análisis de varianza con un valor  $p= 0.012$  se observa que no existe diferencia significativa entre las medias de CO<sub>2</sub> secuestrado por sumideros a un nivel de significancia  $\alpha= 0.01$ ; por lo que se acepta la hipótesis nula de medias y se infiere que a diferentes sumideros el CO<sub>2</sub> es secuestrado en proporciones semejantes. Este resultado se debería principalmente por las características similares del suelo, es decir, baja disponibilidad de nutrientes y acidez (Mendiara, 2012).

Tabla 11

*Comparación de medias de secuestro de CO<sub>2</sub> para profundidades.*

Profundidades	N	Subconjunto	
		1	2
10 (0-10 cm)	9	548,733	
30 (30-60 cm)	9		1,506,589
20 (10-30 cm)	9		1,716,956
Sig.		1,000	,532

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 11 se observa las comparaciones múltiples de profundidades. Indican dos grupos, el primero formado por una profundidad de 10 cm y el segundo grupo formado por 30 y 20 cm que reportan los más altos promedios de captura de CO<sub>2</sub> ( $p < 0.01$ , Prueba Duncan).

Tabla 12

*Comparación de medias de secuestro de CO<sub>2</sub> para sumideros.*

Sumideros	N	Subconjunto	
		1	2
Puyas de Raymondi	9	625,578	
Pajonal con chillihuares	9	1,473,489	1,473,489
Bofedal	9		1,673,211
Sig.		,019	,553

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 12 se muestra las comparaciones múltiples de sumideros. Indican dos grupos, el primero formado por Puyas de Raymondi y Pajonal con Chillihuares, y el segundo grupo formado por Pajonal y Bofedal. El segundo reporta los más altos promedios de captura de CO<sub>2</sub> ( $p < 0.01$ , Prueba Duncan).

La variabilidad de los resultados se debería a las siguientes razones:

El Sumidero de Bofedal (s3) tuvo gran capacidad de secuestro de CO<sub>2</sub>, esto se debe a la presencia de MOS, encontrándose el mayor contenido en la segunda capa (10-30 cm profundidad, espesor 20 cm) con una estimación de 92.69 t C/ha, lo cual indica

339.85 t CO<sub>2</sub>/ha secuestrados en el suelo. En esta capa el contenido de COS se debería a la presencia de arcilla (Robert, 1996; Mendiara, 2012; Suárez et al., 2016). A medida que la profundidad aumenta el contenido de COS también (Bečvářová et al, 2018), sin embargo, en la tercera capa (30-60 cm profundidad, espesor 30 cm) disminuyó, esto se debe al contenido de acidez (pH) en el suelo, es decir baja tasa de descomposición (Mendiara, 2012) por ende, los organismos del suelo son inhibidos (FAO, 2019) lo cual reduce el porcentaje de MOS que repercute en el incremento de COS en bajas cantidades, no obstante, el carbono permanece estable (Robert, 1996; Suárez et al., 2016), además la baja cantidad de COS en la tercera capa depende de la densidad aparente ya que con la profundidad aumenta la densidad y/o el grado de compactación y baja disponibilidad de porosidad. Mientras que en la primera capa (0-10 cm profundidad, espesor 10 cm) el COS mostró un bajo contenido debido al exceso de MO (materia vegetal fibrosa - Turba) parcialmente descompuesta y a la saturación de agua (Suárez et al., 2016; Burbano, 2018; Bečvářová et al, 2018).

El Sumidero de Pajonal con Chillihuales (s2) tiene gran capacidad de secuestro de CO<sub>2</sub> esto se debe a la presencia de MOS, encontrándose el mayor contenido en la tercera capa (30-60 cm profundidad, espesor 30 cm) con una estimación de 67.87 t C/ha, lo cual indica 248.93 t CO<sub>2</sub>/ha secuestrados en el suelo. Además, se debe a la alta densidad aparente del suelo. La primera y la segunda capa del s2 presentaron baja densidad debido a la presencia de material parcialmente descompuesto y presencia de raíces, los cuales repercuten en el contenido de COS. Estos suelos de pajonal con chillihuales “son de color marrón oscuro a negro debido a su riqueza en humus” (FAO, 2017) lo que indica que tienen un buen porcentaje de MO.

El Sumidero de las Puyas de Raimondi (s1) tienen la capacidad de secuestrar el CO<sub>2</sub> en ambientes y/o terrenos rocosos en comparación con otras especies, pues no

pueden realizar este tipo de servicio principalmente porque dependen mucho de la presencia de MO y nutrientes en el suelo para desarrollarse. Encontrándose el mayor contenido en la segunda y tercera capa, con una estimación 19.14 y 17.96 t C/ha de COS respectivamente, lo cual indica 70.18 y 65.84 t CO<sub>2</sub>/ha; estos resultados fueron bajos en comparación con los sumideros s3 y s2, debido a la baja presencia de MOS. La densidad aparente influyó en los resultados de capas profundas, siendo estos de espacios más porosos, el cual se debe principalmente a la meteorización de la roca madre; además las raíces del s1 favorecen dicha meteorización. Sin embargo, este sumidero presentó mucha heterogeneidad en su desarrollo vegetativo, los cuales crecen sobre: Terrenos rocosos, afloramientos rocosos, suelos húmedos y en formaciones vegetales de pajonales y arbustivos (Apolinario & Carmen, 2015). Siendo su hábitat preferido los primeros dos.

Tabla 13

Comparación del CO<sub>2</sub> total, en promedio, secuestrado en diferentes sumideros y profundidades.

Investigadores	Lugar de estudio	Sumidero	Tiempo	Codigo	Profundidad	Densidad aparente	COS		CO <sub>2</sub>	Ecosistema
					cm	g/cm <sup>3</sup>	%	t/ha	t/ha	
(Autores, 2018)	Puno (San Antonio de Putina - Bellavista) - Perú	s1	2018		p1=0-10	1.07	1.32	14.09	51.66	Rodales de Puya de Raimondi
					p2=10-30	0.99	0.97	19.14	70.18	
					p3=30-60	0.95	0.63	17.96	65.84	
		s2			p1=0-10	0.5	4.8	24.02	88.06	Pajonal con chillihuales
				p2=10-30	0.39	3.67	28.65	105.06		
				p3=30-60	0.93	2.43	67.89	248.93		
		s3			p1=0-10	0.15	4.53	6.79	24.9	Bofedal
				p2=10-30	1.21	3.83	92.69	339.85		
				p3=30-60	1.62	0.77	37.42	137.21		
(Cillis et al., 2018)	Venecia - Italia		2014	A	p1=0-10	1.66	0.71	11.786	43.22	Tierra de cultivo
		B		p1=0-10	1.65	0.71	11.715	42.96		
		C		p1=0-10	1.55	1.11	17.205	63.09		
		D		p1=0-10	1.52	1.38	20.976	76.91		
		A		p2=10-30	1.61	0.65	20.93	76.74		
		B		p2=10-30	1.52	0.68	20.672	75.80		
		C		p2=10-30	1.61	1.22	39.284	144.04		
		D		p2=10-30	1.62	1.38	44.712	163.94		
		A		p3=30-60	1.67	0.53	26.553	97.36		
		B		p3=30-60	1.56	0.57	26.676	97.81		
		C		p3=30-60	1.67	1.04	52.104	191.05		
		D		p3=30-60	1.62	1.33	64.638	237.01		

(Cillis et al., 2018)	<i>Venecia - Italia</i>	2017	A	p1=0-10	1.67	0.66	11.022	40.41	Tierra de cultivo	
			B	p1=0-10	1.61	0.64	10.304	37.78		
			C	p1=0-10	1.64	1.04	17.056	62.54		
			D	p1=0-10	1.63	1.26	20.538	75.31		
			A	p2=10-30	1.61	0.63	20.286	74.38		
			B	p2=10-30	1.59	0.61	19.398	71.13		
			C	p2=10-30	1.63	1.07	34.882	127.90		
			D	p2=10-30	1.62	1.12	36.288	133.06		
			A	p3=30-60	1.64	0.64	31.488	115.46		
			B	p3=30-60	1.62	0.7	34.02	124.74		
			C	p3=30-60	1.68	1.06	53.424	195.89		
			D	p3=30-60	1.66	1.06	52.788	193.56		
(Zhu et al., 2015)	<i>Pekín - China</i>	Abedul	1992-1994				207	759.00	Montañas y bosques templados permanentes	
			2011-2014				214.8	787.60		
		Roble	1992-1994				239.1	876.70		
			2011-2014				241.7	886.23		
		Pino	1992-1994				231.7	849.57		
			2011-2014				238.4	874.13		
(Błońska & Lasota, 2017)	<i>Polonia</i>	2017	WT <sub>80-100</sub>	O	p3=80-100	0.41±0.21	241.83±74.21*			Zona Reservada (Gradiente de humedad)
				AE	p3=80-100	1.14±0.11	35.07±19.41*	14.09±2.97	51.66	
				G	p3=80-100	1.34±0.01	4.87±2.01*			
			Húmedo	A	p2=40-50	0.83±0.25	101.10±49.29*			
				AG	p2=40-50	1.25±0.08	24±29±13.80*	12.61±3.71	46.24	
				G	p2=40-50	1.35±0.02	3.95±2.30*			
			Pantanosos	AM	p1=0-30	0.69±0.31	135.96±107.11*			
				AG	p1=0-30	1.07±0.19	44±34.29*	19.02±1.82	69.74	
				G	p1=0-30	1.31±0.08	8.51±4.31*			

(Montes et al, 2016)	Cundinamarca - Colombia	Vegetación Natural	2016		p1=0-25	0.26±0.05	27.09±2.88	188	689.33	Páramo andino
					P2=25-50	0.28±0.05	24.97±3.64	183	671.00	
					P3 = >50	0.28±0.07	26.00±7.28	178	652.67	
		Cultivo de Papa		P1=0-25	0.51±0.14	11.06±9.06	119	436.33		
				P2=25-50	0.66±0.14	4.87±1.57	82	300.67		
				P3 = >50	0.76±0.16	3.91±1.43	72	264.00		
(Apolinario & Carmen, 2015)	Ayacucho - Perú	Puya de Raimondii	2015	DA	p1=0-25			116.836	428.40	Bosque de Puya de Raimondii (ACR)
				DM	p1=0-25			84.203	308.74	
				DB	p1=0-25			73.999	271.33	
(Palomino, 2007)	Lima (Cañete) - Perú	Humedales	2007	J	p1=0-20	1.65	3	99	363.00	Humedales
				S	p1=0-20	1.65	0.17	5.61	20.57	
				GS	p1=0-20	1.65	0.35	11.55	42.35	
				T	p1=0-20	1.65	0.29	9.57	35.09	
(Li et al., 2018)	Shandong - China		2018	CK	p1=0-20	1.35±0.03		19.88±1.37	72.89	Tierra de cultivo (Estación experimental Dezhou) Z. clima Monzon
				SMF	p1=0-20	1.30±0.05		22.28±2.51	81.69	
				SMA	p1=0-20	1.19±0.02		37.17±1.47	136.29	
				2S(+)	p1=0-20	1.17±0.08		28.63±4.47	104.98	
				DMF	p1=0-20	1.26±0.03		24.15±1.84	88.55	
				DMA	p1=0-20	1.12±0.05		55.27±2.93	202.66	
(Ramnarine et al., 2018)	Ontario - Canadá		2018	CT	p1=0-10			25.5	93.50	Tierras de cultivo (Estación de invest.)
				NT	p1=0-10			28.9	105.97	
(Yang et al., 2018)	Cajamarca - Perú				p1=0-10			63	231.00	Zona alpina de pastizales neotropical de Jalca (Entre Páramo humedo y
					p2=0-40			172	630.67	
				AB				185±25	678.33	
				CB				258±34	946.00	

Fuente. Elaboración propia. Nota: \*C (g.kg<sup>-1</sup>) y WT<sub>80-100</sub> (Mesa de agua)

(Alvis, 2018)	<i>Arequipa - Perú</i>	Bofedal	2017	p1=0-30			218.28	800.36	Bofedal
(Hanco, 2018)	<i>Puno - Huancané</i>	Pastura	2018	p1=0-20	1.36	1.23	33.51	122.87	Pajonal de puna húmeda
				p2=20-40	1.36	0.81	22.15	81.22	
		Eucalipto		p1=0-20	1.25	1.04	26.04	95.49	Plantación forestal
				p2=20-40	1.25	0.94	23.52	86.24	
(Sulca, 2018)	<i>Puno - Ayaviri</i>	Pastura	2018	p1=0-20	1.16	1.82	42.17	154.64	Pajonal de puna húmeda
				p2=20-40	1.28	1.22	31.22	114.49	
		Queñual		p1=0-20	0.87	7.97	139.25	510.59	Bosque relicto altoandino
				p2=20-40	1.06	3.98	84.48	309.76	
(Enriquez, 2018)	<i>Puno - Carabaya</i>	Pastura	2018	p1=0-20	1.11	1.38	30.67	112.47	Bosque montano de yunga
				p2=20-40	1.15	1.03	23.64	86.68	
		Café		p1=0-20	0.92	4.18	76.62	280.93	
				p2=20-40	0.96	3.66	70.38	258.04	
(Mayta, 2019)	<i>Puno - Puno</i>	Pino	2018	p1=0-15	1.39	2.94	61.57	225.74	Plantación forestal
		Pastizal		p1=0-15	1.17	4.97	87.44	320.60	Pajonal de P. H.
		SAF Aliso		p1=0-10			24.67	90.46	Montano alto, páramo arbustivo
p2=10-20				20.37	74.69				
p3=20-40				15.46	56.69				
(Farez, 2019)	<i>Ecuador</i>	SAF Pino	2018	p1=0-10			13.85	50.78	Montano alto, páramo arbustivo
				p2=10-20			8.81	32.30	
				p3=20-40			7.80	28.60	

(Fernández, 2019)	<i>Cajamarca - Perú</i>	Turberas (Befadal)	2018	M1	p1=0-30	1.109	2.64	87.83	322.05	Jalca
				M2	p1=0-30	1.000	21.876	656.28	2,406.36	
				M3	p1=0-30	1.100	9.246	305.12	1,118.77	
				M4	p1=0-30	0.994	9.414	280.73	1,029.33	
				M5	p1=0-30	0.942	14.07	397.62	1,457.93	
				M6	p1=0-30	1.157	9.531	330.82	1,213.01	
				M7	p1=0-30	1.070	30.151	967.85	3,548.77	
				M8	p1=0-30	0.897	27.203	732.03	2,684.12	
				M9	p1=0-30	1.264	5.327	202.00	740.67	
				M10	p1=0-30	1.012	7.236	219.68	805.51	
(Guillen & Salome, 2019)	<i>Junín - Perú</i>	Bosque - Polylepis	2018	P1	p1=0-30			141.85	520.12	Pajonal de puna húmeda
				P2	p1=0-30			146.04	535.48	
(Rosero, 2019)	<i>Chimborazo - Ecuador</i>	Páramo	2018		pt=0-60			109.51±55.01	401.54	Páramo
		Cultivos			pt=0-60			136.92±41.95	502.04	
		Pastizales			pt=0-60			152.18±93.16	557.99	
		Plantaciones			pt=0-60			90.37±18.019	331.36	
(Kumar et al., 2018)	<i>Loreto - Perú</i>	Especies de palmeras	2018	Ita.	p1=0-100			400	1,466.67	Pantano de palmeras (aguajales)
				Tig.	p1=0-100			570	2,090.00	
				Sam.	p1=0-100			330	1,210.00	
(Jones et al., 2019)	<i>Barro Colorado - Panamá</i>	Bosque tropical	2019	AGB				61.35	224.95	Bosque tropical
				Ne				1.72	6.31	
				BGB				12.48	45.76	
				Soil	P1=0-100			176.22	646.14	

Fuente: elaboración propia

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

Los resultados obtenidos evidencian que el Bofedal tiene gran capacidad de secuestrar el dióxido de carbono, mostrando el 44 % (501.96 tCO<sub>2</sub>/ha), seguido por Pajonal con Chillihuales con 39 % (442.05 tCO<sub>2</sub>/ha) y finalmente las Puyas de Raimondi con 17 % (187.68 tCO<sub>2</sub>/ha); estos resultados muestran la cantidad total de CO<sub>2</sub> secuestrados a un espesor de 60 cm de profundidad en el suelo.

Se determinó el secuestro de CO<sub>2</sub> en el suelo de los tres sumideros evaluados, los cuales mostraron una diferencia significativa para las profundidades ( $p= 0.005$ ) más no para los sumideros ( $p= 0.012$ ). De acuerdo a la prueba de Duncan, las profundidades de 30 y 20 cm en s3 y s2 reportaron los más altos promedios de secuestro de CO<sub>2</sub> con valores promedios de 193.07 y 222.505 tCO<sub>2</sub>/ha respectivamente.

Los suelos de las Puyas de Raymondi se categorizaron como “bajo” en porcentaje de materia orgánica; los Bofedales y Pajonales se clasificaron como “alto”. Los s2 y s3 mostraron baja DA, el cual evidencia presencia de MO; el s1 reportó un ligero aumento de la DA, lo que significa escasa presencia de MO. Los tres sumideros reportaron suelos

“fuertemente ácidos”. La disponibilidad de nutrientes en los tres sistemas estudiados fue “bajo” y no es de extrañar pues son característicos de la región de Puno (Mamani, 2016).

Los suelos de páramos, resaltan en la acumulación y estabilidad del carbono, este tipo de ecosistemas está relacionado con altas cantidades de humus. Así también, los Bofedales, de acuerdo a su extensión, contribuyen en gran parte el secuestro de carbono. Sin embargo, estos y otros ecosistemas semejantes, son vulnerables frente al cambio climático.

## **5.2 Recomendaciones**

Se recomienda desarrollar investigaciones sobre la distribución espacio temporal del flujo de carbono en los ecosistemas potenciales de COS. A demás en los estudios de COS se recomienda, considerar los factores asociación microorganismos y vegetales.

Se recomienda realizar estudios con sensores de medición de gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) y sensor de parámetros meteorológicos (temperatura, precipitación y humedad) para observar el flujo y la relación que existe, entre estos parámetros. Las aplicaciones se pueden dar en la agricultura, conservación de sumideros de carbono, manejo y gestión sostenible de los suelos, establecer el potencial de los ecosistemas, sistemas agroforestales, turismo sostenible, bioenergía y otras aplicaciones.

Para determinar resultados más aproximados y precisos se debe estimar el secuestro de carbono en la distribución vertical de suelo de áreas de Bofedal. Se recomienda tener más repeticiones y muestrear cada 10 cm en la profundidad, hasta una profundidad de 50 cm. Ya que desde este punto a más se estima poca o nula presencia de carbono orgánico. Sin embargo, tener en cuenta el costo de presupuesto para los análisis.

Para determinar la dinámica del flujo de carbono en el tiempo se recomienda, evaluar por periodos o estratificado en el tiempo. Pues los factores climáticos influyen en su flujo.

Desarrollar caracterización y diagnóstico de ecosistemas de bofedales como línea de base para desarrollar formular programas y estrategias de conservación (áreas de conservación). Donde el objetivo principal debe enfocarse en su aprovechamiento sostenible de los servicios ambientales que brinda, el cual deriva en múltiples acciones.

Realizar estudios basados en infraestructuras verdes (Puya de Raimondi) e implementar los mismos en áreas urbanas con criterios técnicos.

Implementar acciones y actividades sostenibles en el distrito de Putina, sus ecosistemas tienen gran potencial en términos de servicios ambientales. Como el turismo sostenible, y otras actividades basados en los “objetivos de desarrollo sostenible al 2030” contribuirán enormemente a objetivos globales.

## REFERENCIAS

- Aguinaco, V. (2008). *Captura y almacenamiento de dióxido de carbono*. Academia de Ingeniería. México. Retrieved from [http://www.ai.org.mx/ai/archivos/coloquios/6/Captura\\_y\\_Alamacenamiento\\_de\\_Di\\_oxido\\_de\\_Carbono.pdf](http://www.ai.org.mx/ai/archivos/coloquios/6/Captura_y_Alamacenamiento_de_Di_oxido_de_Carbono.pdf)
- Alvis, T. (2018). Almacenamiento de carbono en los humedales altoandinos del centro poblado Chalhuanca, Caylloma - Arequipa, 2017. *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa*, 150 p. Retrieved from <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8214>
- Anguiano, J., Aguirre, J., & Palma, J. (2013). Secuestro de carbono en la biomasa aérea de un sistema agrosilvopastoril de Cocos nucifera, *Leucaena leucocephala* Var. Cunningham y *Pennisetum purpureum* Cuba CT-115. México. *Avances En Investigacion Agropecuaria*, 17(1), 149–160.
- Apolinario, J., & Carmen, K. (2015). *Capacidad de almacenamiento de carbono en un bosque joven y maduro de Puya raimondii Harms, Vilcashuaman – Ayacucho*. Universidad Nacional del Centro del Perú. Retrieved from [http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3493/Apolinario\\_Diego\\_-\\_Carmen\\_Cardenas.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3493/Apolinario_Diego_-_Carmen_Cardenas.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Aponte, J., Efrén, J., & Posada, E. (2017). Caracterización y modelamiento espacial de patrones en humedales alto andinos , Perú , mediante algoritmos , periodo 1985-2016. *Revista Geográfica*, 149–170.
- Aquino, M., Velázquez, A., Etchevers, J., & Castellanos, J. (2018). Concentración de carbono en tres especies de árboles tropicales de la Sierra Sur de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 52(3), 455–465.

- Aquino, W., Condo, F., Romero, J., Yllaconza, R., & La Torre, M. I. (2019). Flora y vegetación asociada a los rodales de *Puya raimondi* de Huarochirí, Lima, Perú. *Revista Peruana de Biología*, 26(1), 9–20.  
<https://doi.org/10.15381/rpb.v26i1.14551>
- Arango, B. (2011). Sumideros de carbono en el marco del Protocolo de Kioto. *Memorando de Derecho*, (2), 13–21. Retrieved from  
<http://dialnet.unirioja.es/servlet/oaiart?codigo=3851095>
- Arnell, A., Barbosa, H., Benton, T., Calvin, K., Calvo, E., Connors, S., ... Zommers, Z. (2019). *Climate Change and Land: Summary for Policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Retrieved from  
<https://www.ipcc.ch/report/srccl/>
- Asner, G., Knapp, D., Martín, R., Tupayachi, R., Anderson, C., Mascaro, J., ... Neyra, A. (2014). La geografía del carbono en alta resolución del Perú. *Carnegie Institution for Science y MINAM*, 69 p. Retrieved from  
<http://geoservidor.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/CarnegiePeruCarbonReport-Spanish.pdf>
- Becvárová, P., Horváth, M., Sarapatka, B., & Zouhar, V. (2018). Dynamics of soil organic carbon (SOC) content in stands of Norway spruce (*Picea abies*) in central Europe. *IForest - Biogeosciences and Forestry*, 11(6), 734–742.  
<https://doi.org/10.3832/ifor2521-011>
- Benjamín, J., & Masera, O. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. México. *Madera y Bosques*, 7(1), 3–12. Retrieved from  
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61770102>
- Błońska, E., & Lasota, J. (2017). Soil Organic Matter Accumulation and Carbon

- fractions along a Moisture Gradient of Forest Soils. Poland. *Forests*, 8(11), p 448.  
<https://doi.org/10.3390/f8110448>
- Brack, A., & Mendiola, C. (2000). *Ecología del Perú*. (Bruño, Ed.).
- Canaza, D. (2018). Modelamiento de los servicios ecosistémicos de rodales de *Puya raimondii* Harms; del distrito de Ayaviri - Región Puno, 41 p. Retrieved from  
<http://repositorio.uancv.edu.pe:8080/handle/UANCV/2098>
- Carrasco, C. (2019). Influencia de la Napa freática sobre la vegetación y capacidad de carga animal en bofedales altoandinos, 157 p. Retrieved from  
[http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/cybertesis/10377/Portal\\_qe.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/cybertesis/10377/Portal_qe.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Castañeda, A., & Montes, C. (2017). Carbono almacenado en páramo andino. *Entramado*, 13(1), 210–221. <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25112>
- Castellanos, E., Quilo, A., & Amboage, R. (2010). Metodología para la Estimación del contenido de carbono en bosques y sistemas en Guatemala. *Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad de La Universidad Del Valle de Guatemala*. Retrieved from  
[http://www.uvg.edu.gt/investigacion/ceab/cea/doc/metodologias/Metodología\\_Estimación de Carbono-español\\_CEAB-UVG 2010.pdf](http://www.uvg.edu.gt/investigacion/ceab/cea/doc/metodologias/Metodología_Estimación de Carbono-español_CEAB-UVG 2010.pdf)
- Chacho, J. (2019). Evaluación de la capacidad de captura de carbono de los sistemas hortícolas, parroquia San Joaquín, cantón Cuenca. *Universidad Politecnica Salesiana Sede Cuenca*.
- Choquecagua, N. (2013). Germinación de semillas de *Puya raimondii* Harms en condiciones de laboratorio. Puno. *Respositorio Institucional UNA - Puno*, 94 p.

Retrieved from <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/1941>

- Cillis, D., Maestrini, B., Pezzuolo, A., Marinello, F., & Sartori, L. (2018). Modeling soil organic carbon and carbon dioxide emissions in different tillage systems supported by precision agriculture technologies under current climatic conditions. *Soil and Tillage Research*, 183(June), 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.06.001>
- Costa, E. N., Landim, M., Lima, P., Lobão, D., & Lopes, D. (2018). Soil organic matter and CO<sub>2</sub> fluxes in small tropical watersheds under forest and cacao agroforestry. Brasil. *PLoS ONE*, 13(7), 1–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200550>
- Crispin, M., & Jimenez, L. (2019). Valoración económica ambiental de los bofedales del distrito de Pilpichaca, Huancavelica, Perú. *Natura Economía*, 4(1), 1–13. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21704/ne.v4i1.1299>
- Enriquez, L. (2018). Determinación de captura de carbono en suelos de un sistema agroforestal con café (*Coffea arábica*) en el Valle Esquilaya - Región Puno, 2018. *Universidad Peruana Unión*, 62 p. Retrieved from [https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/UPEU/1712/Luz\\_Tesis\\_Licenciatura\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/UPEU/1712/Luz_Tesis_Licenciatura_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- FAO. (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informe sobre recursos mundiales de suelos N° 96. Roma*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-bl001s.pdf>
- FAO. (2017). *Carbono orgánico del suelo el potencial oculto. Roma*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/b-i6937s.pdf>
- FAO. (2019). Portal de Suelos de la FAO, Propiedades Químicas. *Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura*. Retrieved from

<http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>

Farez, D. (2019). Evaluación de carbono en hojarasca y suelo en sistemas agroforestales de cafeto (*Coffea arábica* L) con pino (*Pinus patula*) y aliso (*Alnus acuminata*) en el cantón Loja. *Universidad Nacional de Loja*, 76 p. Retrieved from <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/22161>

Fernández, M. (2019). Cuantificación del carbono orgánico acumulado en el suelo de turberas de Alto Perú en Cajamarca - 2018. *Universidad Privada Del Norte*, 69 p. Retrieved from <http://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/21810>

Flores, M. (2017). *Captura de dióxido de carbono (CO2) en la Chillihua (Festuca dolichophylla Presl) de los paltizales del CIP Illpa-Puno. Univesidad Nacional del Altiplano*. Retrieved from <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/3900>

Galán, E. (2009). *Captura y almacenamiento de CO2*. Retrieved from <http://www.rasc.es/assets/rasc---monografia-vol.-2.pdf>

GRI. (2017). Ciencia de los Orígenes. *Geoscience Research Institute*, (Número 92), p 30. Retrieved from [www.grisda.org/espanol](http://www.grisda.org/espanol)

Guillen, E., & Salome, L. (2019). Capacidad de almacenamiento de carbono en el bosque natural de *Polylepis rodolfo-vasquezii* L . Valenzuela & Villalva en la Comunidad Campesina de María Moya , Comas , Concepción. *Universidad Nacional Del Centro Del Perú*, 106 p. Retrieved from <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/5345>

Hanco, E. (2018). Determinación de la captura de carbono en suelos con eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill) en el distrito de Huancané-Puno, 2018. *Universidad*

*Peruana Unión*, 66 p. Retrieved from

[https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/UPEU/1785/Esther\\_Tesis\\_Licenciatura\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/UPEU/1785/Esther_Tesis_Licenciatura_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Hermitaño, S. (2018). Escenarios de la Puya Raimondi en relación con los factores meteorológicos de temperatura y precipitación y los antropogénicos en el santuario Nacional de Calipuy (La Libertad ) y el Parque Nacional Huascarán (Áncash), 2018, 117 pp. Retrieved from [http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/18312/Hermitaño\\_LSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/18312/Hermitaño_LSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Hurtado, M. (2016). Reactores capilares para Foto-Síntesis artificial. *Universidad Autónoma de México*.

IPCC. (2005). *Panorama general*. Reino Unido, Federación de Rusia, Japón, Brasil, Estados Unidos, Australia, Cuba. Retrieved from <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf/spanish/full.pdf>

IPCC. (2014). *Anexo II: Glosario [Mach, K.J., S. Planton y C. von Stechow (eds.)]. En: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio*. Ginebra, Suiza.

IPCC. (2018). *Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the .* Retrieved from [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15\\_AnnexI\\_Glossary.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_AnnexI_Glossary.pdf)

- Jones, I. L., DeWalt, S. J., Lopez, O. R., Bunnefeld, L., Pattison, Z., & Dent, D. H. (2019). Above- and belowground carbon stocks are decoupled in secondary tropical forests and are positively related to forest age and soil nutrients respectively. *Science of The Total Environment*, 697, 133987. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133987>
- Kalra, Y., & Maynard, D. (1991). *Methods manual for forest soil and plant analysis* (Edmonton,). For. Can., Northwest Reg., North. For. Cent. Retrieved from [http://cfs.nrcan.gc.ca/bookstore\\_pdfs/11845.pdf](http://cfs.nrcan.gc.ca/bookstore_pdfs/11845.pdf)
- Kumar, R., Lent, J., Grandez, J., Hergoualc, K., Honorio, E., & Murdiyarso, D. (2019). Impacts of *Mauritia flexuosa* degradation on the carbon stocks of freshwater peatlands in the Pastaza-Marañón river basin of the Peruvian Amazon. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24(4), 645–668. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9809-9>
- Laterra, P., Vignolio, O., Hidalgo, L., Fernández, O., Cauhépé, M., & Maceira, N. (1998). Dinámica de pajonales de paja colorada (*Paspalum* spp.) manejados con fuego y pastoreo en la pampa deprimida Argentina. *Ecotrópicos*, 11(2), 141–149. Retrieved from file:///C:/Users/NETBOOK/Downloads/10266-30532-1-SM.pdf
- Li, J., Wen, Y., Li, X., Li, Y., Yang, X., Lin, Z., ... Zhao, B. (2018). Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain. *Soil and Tillage Research*, 175(October 2017), 281–290. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.08.008>
- Lipa, C. (2017). Recursos naturales potenciales para el desarrollo de turismo ecológico en las unidades territoriales del distrito de Putina, corredor ecológico Bahuaja Sonene - Puno., 157 p. Retrieved from

<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5154>

López, G., Lira, R., & Méndez, B. (2016). Medición de Intercambio Gaseoso, Área

Foliar e Índice de Clorofila en Plantas Elicitadas con Nanopartículas. México.

*Centro de Investigación En Química Aplicada*. Retrieved from

<https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1025/338>

Madrigal, S., Cristóbal, D., & Hernández, E. (2018). Influencia de la cobertura,

pendiente y profundidad, sobre el carbono y nitrógeno del suelo. México. *Revista*

*Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(51).

<https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i51.113>

Mamani, G. (2016). Ecología de los humedales altoandinos del Norte de ayacucho y Sur

de Huancavelica, Perú. Retrieved from

<https://gmmpastizales.blogspot.com/2016/06/ecologia-de-los-humedales->

[altoandinos.html](https://gmmpastizales.blogspot.com/2016/06/ecologia-de-los-humedales-altoandinos.html)

Maquera, D. (2017). *Determinación del contenido de carbono por especie forestal en el*

*bosque del CIP Camacani - UNA - Puno por titulación*. Univesidad Nacional del

*Altiplano*. Retrieved from

[http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/6183/Maquera\\_Maquera\\_D](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/6183/Maquera_Maquera_D)

[elia.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/6183/Maquera_Maquera_D)

Martínez, E., Fuentes, J., & Acevedo, E. (2008). Carbono Orgánico y Propiedades del

Suelo. *R.C. Suelo Nutr. Veg.*, 8(1), 68–96. <https://doi.org/10.4067/S0718->

[27912008000100006](https://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006)

Martínez, J., Fernández, A., & Osnaya, P. (2014). *Cambio climático: una visión desde*

*México*.

- Mayta, P. (2018). Evaluación del efecto de la plantación forestal de Pino (*Pinus radiata*) sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo en la comunidad Huerta Huaraya – Puno, 2018. *Universidad Peruana Unión*, 68 p. Retrieved from <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/UPEU/1688>
- Mendiara, S. (2012). Efecto de los usos del suelo en la emisión de dióxido de carbono del suelo a la atmósfera en un agroecosistema semiárido del Valle del Ebro., 82 p. Retrieved from [http://digital.csic.es/bitstream/10261/171583/1/Alvaro-FuentesJ\\_TFC\\_2012.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/171583/1/Alvaro-FuentesJ_TFC_2012.pdf)
- Meneses, R., Loza, S., Lliully, A., Palabral, A., & Anthelme, F. (2014). Métodos para cuantificar diversidad y productividad vegetal de los bofedales frente al cambio climático. *Ecología En Bolivia*, 49(3), 42–55. Retrieved from [http://www.scielo.org.bo/pdf/reb/v49n3/v49n3\\_a05.pdf](http://www.scielo.org.bo/pdf/reb/v49n3/v49n3_a05.pdf)
- MINAM. (2014). *Guía para el Muestreo de Suelos* (Ministerio). Lima. <https://doi.org/624.1517>
- MINAM. (2019). *Mapa nacional de ecosistemas del Perú, memoria descriptiva*. Ministerio del Ambiente. Retrieved from [www.minam.gob.pe](http://www.minam.gob.pe)
- Montes, C., Ramos, J., & San José, A. (2016). Estimation of soil organic carbon (SOC) at different soil depths and soil use in the Sumapaz paramo, Cundinamarca - Colombia. *Acta Agronómica*, 66(1), 95–101. <https://doi.org/10.15446/acag.v66n1.53171>
- Mu, L., Liang, Y., & Han, R. (2014). Assessment of the Soil Organic Carbon Sink in a Project for the Conversion of Farmland to Forestland: A case study in Zichang County, Shaanxi, China. *PLoS ONE*, 9(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094770>

Palomino, D. (2007). *Estimación del servicio ambiental de captura del CO<sub>2</sub> en la flora de los humedales de Puerto Viejo. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.*

Retrieved from

[http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol110\\_n20/a07.pdf%0Ahttp://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/cybertesis/800/Palomino\\_cd.pdf;jsessionid=6C49A8A48509296B554AFF9B3B5923B9?sequence=1](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol110_n20/a07.pdf%0Ahttp://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/cybertesis/800/Palomino_cd.pdf;jsessionid=6C49A8A48509296B554AFF9B3B5923B9?sequence=1)

Portal, E. (2019). Influencia de la Napa freática sobre la vegetación y capacidad de carga animal en bofedales altoandinos. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 157 p. Retrieved from

<http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/10377>

Ramnarine, R., Voroney, R. P., Dunfield, K. E., & Wagner-Riddle, C. (2018).

Characterization of the heavy, hydrolysable and non-hydrolysable fractions of soil organic carbon in conventional and no-tillage soils. *Soil and Tillage Research*, 181(April), 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.010>

Rosero, G. (2019). Evaluación de carbono orgánico del suelo en el ecosistema de páramo de microcuenca del río Chimborazo en base a las actividades antrópicas.

*Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*, 93 p. Retrieved from

<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/11124>

Santillana, N., & Toro, M. (2018). Asociación micorrízica arbuscular en pastizales de la comunidad Alto Andina de Ccarhuaccpampa – Ayacucho. *Ecología Aplicada*,

17(2), 1726–2216. <https://doi.org/10.21704/rea.v17i2.1236>

Si, G., Yuan, J., Xu, X., Zhao, S., Peng, C., Wu, J., & Zhou, Z. (2018). Effects of an integrated rice-crayfish farming system on soil organic carbon, enzyme activity, and microbial diversity in waterlogged paddy soil. *Acta Ecologica Sinica*, 38(1),

29–35. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2018.01.005>

Suárez, D., Acurio, C., Chimbolema, S., & Aguirre, X. (2016). Análisis del carbono cecuestrado en humedales altoandinos de dos áreas protegidas del Ecuador.

*Ecología Aplicada*, 15(2), 1726–2216. <https://doi.org/10.21704/rea.v15i2.756>

Sullca, W. (2018). Determinación de la captura de carbono en suelos forestales de queñual (*Polylepis* sp.) en la comunidad de Quello Quello, Región Puno, 2018.

*Universidad Peruana Unión*, 65 p. Retrieved from

[https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/UPEU/1715/Wendy\\_Tesis\\_Licenciatura\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/UPEU/1715/Wendy_Tesis_Licenciatura_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

USDA. (1999). *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica. Washington, DC.

Retrieved from

[https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf)

Wheather-Spark. (2019). El clima promedio en Putina. Retrieved from

<https://es.weatherspark.com/y/27081/Clima-promedio-en-Putina-Perú-durante-todo-el-año>

White, E. G. (2012). *La Historia de la Rdención*. *Ellen G. White Estate*.

Yang, S., Cammeraat, E., Jansen, B., den Haan, M., van Loon, E., & Recharte, J.

(2018). Soil organic carbon stocks controlled by lithology and soil depth in a Peruvian alpine grassland of the Andes. *Catena*, 171(January), 11–21.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.038>

Yaranga, R., Custodio, M., Chanamé, F., & Pantoja, R. (2018). Floristic diversity in grasslands according to plant formation in the Shullcas river sub-basin, Junin,

Peru. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 511–517.

<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.06>

Zhu, J. X., Hu, X. Y., Yao, H., Liu, G. H., Ji, C. J., & Fang, J. Y. (2015). A significant carbon sink in temperate forests in Beijing: based on 20-year field measurements in three stands. *Science China Life Sciences*, 58(11), 1135–1141.

<https://doi.org/10.1007/s11427-015-4935-z>

# ANEXOS

## Anexo A. Certificado de resultados de análisis de suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
FACULTAD DE AGRONOMIA  
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



### INFORME DE ANALISIS DE SUELO - FERTILIDAD

SOLICITANTE : DANIEL MAGNO MAMANI QUISPE - HENRY OMAR MAMANI MAMANI  
PROCEDENCIA : PUNO/ SAN ANTONIO DE PUTINA/ PUTINA/ CENTRO POBLADO BELLAVISTA  
REFERENCIA : H.R. 65594  
FACTURA : 3794  
FECHA : 05/10/2018

Número Muestra		pH (1:1)	CE <sub>(1:1)</sub> dS/m	CaCO <sub>3</sub> %	M.O. %	P ppm	K ppm	Al <sup>3+</sup> + H <sup>+</sup> meq/100	N %	C %
Lab	Claves									
424	M1-B1-P1-H3	4.65	0.14	0.00	6.90	3.0	156	0.80	0.26	4.00
425	M2-B1-P2-H3	4.48	0.04	0.00	2.84	3.4	72	1.25	0.08	1.64
426	M3-B1-P3-H3	4.40	0.03	0.00	1.66	2.6	77	1.25	0.06	0.96
427	M4-B2-P1-H2	4.74	0.11	0.00	8.11	2.2	134	0.25	0.26	4.71
428	M5-B2-P2-H2	4.78	0.08	0.00	7.33	3.1	99	0.25	0.25	4.25
429	M6-B2-P3-H2	4.99	0.06	0.00	1.27	1.4	81	0.20	0.06	0.74
430	M7-B3-P1-H1	5.54	0.36	0.00	8.39	4.7	91	0.10	0.31	4.87
431	M8-B3-P2-H1	5.20	0.56	0.00	9.65	2.2	85	0.10	0.34	5.60
432	M9-B3-P3-H1	4.74	0.09	0.00	1.06	2.1	82	0.15	0.05	0.61
433	M10-R1-P1-H1	4.82	0.11	0.00	1.43	4.1	203	0.20	0.06	0.83
434	M11-R1-P2-H1	4.98	0.04	0.00	1.27	5.3	103	0.20	0.04	0.74
435	M12-R1-P3-H1	4.65	0.02	0.00	0.61	5.5	111	0.60	0.03	0.35
436	M13-R2-P1-H2	4.56	0.09	0.00	2.21	2.2	354	0.65	0.08	1.28
437	M14-R2-P2-H2	4.44	0.05	0.00	1.66	3.0	157	0.85	0.10	0.96
438	M15-R2-P3-H2	4.44	0.04	0.00	1.10	5.3	194	1.05	0.05	0.64
439	M16-R3-P1-H2	4.02	0.23	0.00	3.17	7.6	298	0.90	0.13	1.84
440	M17-R3-P2-H2	4.61	0.04	0.00	2.07	15.1	184	0.45	0.07	1.20
441	M18-R3-P3-H2	4.65	0.03	0.00	1.54	25.2	154	0.40	0.10	0.90
442	M19-C1-P1-H3	4.44	0.13	0.00	8.49	3.4	204	0.50	0.32	4.92
443	M20-C1-P2-H3	4.48	0.10	0.00	8.28	3.8	158	0.50	0.31	4.80

Dr. Sady García Bendezu  
Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM  
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622  
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

## Anexo B. Certificado de resultados de análisis de suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
FACULTAD DE AGRONOMIA  
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



### INFORME DE ANALISIS DE SUELO - FERTILIDAD

SOLICITANTE : DANIEL MAGNO MAMANI QUISPE  
 PROCEDENCIA : PUNO/ SAN ANTONIO DE PUTINA/ PUTINA/ CENTRO POBLADO BELLAVISTA  
 REFERENCIA : H.R. 65594  
 FACTURA : 3794  
 FECHA : 05/10/2018

Número Muestra		pH	CE <sub>(1:1)</sub>	CaCO <sub>3</sub>	M.O.	P	K	Al <sup>3+</sup> + H <sup>+</sup>	N	C
Lab	Claves	(1:1)	dS/m	%	%	ppm	ppm	meq/100	%	%
444	M21-C1-P3-H3	4.52	0.05	0.00	3.75	3.3	149	0.90	0.16	2.18
445	M22-C2-P1-H2	4.69	0.15	0.00	13.79	4.2	311	0.30	0.34	8.00
446	M23-C2-P2-H2	4.61	0.08	0.00	5.21	3.3	153	0.60	0.23	3.02
447	M24-C2-P3-H2	4.65	0.05	0.00	3.25	3.0	132	0.50	0.18	1.88
448	M25-C3-P1-H1	4.86	0.25	0.00	2.57	7.6	73	0.10	0.12	1.49
449	M26-C3-P2-H1	4.57	0.24	0.00	5.52	4.3	79	0.15	0.23	3.20
450	M27-C3-P3-H1	4.86	0.15	0.00	5.59	2.2	118	0.10	0.28	3.24



Sady García Bendezú  
Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM  
 Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622  
 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

## Anexo C. Tabla de interpretación

### TABLA DE INTERPRETACIÓN

Salinidad		Reacción o pH	
<b>Clasificación del Suelo</b>	<b>CE(es)</b>	<b>Clasificación del Suelo</b>	<b>pH</b>
*muy ligeramente salino	<2	*Fuertemente ácido	<5.5
*ligeramente salino	2 - 4	*Moderadamente ácido	5.6 - 6.0
*moderadamente salino	4 - 8	*Ligeramente ácido	6.1 - 6.5
*fuertemente salino	>8	*Neutro	7.0
		*Ligeramente alcalino	7.1 - 7.8
		*Moderadamente alcalino	7.9 - 8.4
		*Fuertemente alcalino	>8.5

	<b>Materia Orgánica</b>	<b>Fósforo disponible</b>	<b>Potasio disponible</b>
<b>CLASIFICACIÓN</b>	<b>%</b>	<b>ppm P</b>	<b>ppm K</b>
*bajo	<2.0	<7.0	<100
*medio	2 - 4	7.0 -14.0	100 - 240
*alto	>4.0	>14.0	>240

Relaciones Catiónicas			Distribución de Cationes %		
<b>Clasificación</b>	<b>K/Mg</b>	<b>ca/Mg</b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>=</b>	<b>60 - 75</b>
*Normal	0.2-0.3	5	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>=</b>	<b>15 - 20</b>
*defc. Mg	<0.5		<b>K<sup>+</sup></b>	<b>=</b>	<b>3 - 7</b>
*defc. K	<0.2		<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>=</b>	<b>&lt;15</b>
*defc. Mg		>10			

## Anexo D. Certificado de resultados de análisis de densidad aparente



PERÚ Ministerio de Agricultura y Riego



### CERTIFICADO EN ANALISIS

SOLICITANTE : Daniel Magno Mamani Quispe, Henry Omar Mamani Mamani.  
 PROYECTO : Determinación del Secuestro de Dioxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en el suelo mediante Sumideros de carbono: Puyas de Raimondi (Puya Raimondii Harms), Pajonal con Chilliguares y Bofedal, en el distrito de Putina, Puno-2018.  
 DIRECCION :  
 PROCEDENCIA : Provincia de San Antonio de Putina.  
 PRODUCTO : Suelo.  
 TIPO DE ANALISIS : Da.  
 N° DE ANALISIS : 09.  
 FECHA DE MUESTREO : 25 de Octubre del 2018.  
 FECHA DE RECEPCIÓN : 29 de Octubre del 2018.  
 FECHA DE CERTIFICACIÓN: 30 de Octubre del 2018.

N°	PROFUNDIDAD	DA gr/cm <sup>3</sup>
01	Chilligua p1=0-10	0,50
02	Chilligua p2=10-30	0,39
03	Chilligua p3=30-60	0,93
04	Bofedal p1=0-10	0,15
05	Bofedal p2=10-30	1,21
06	Bofedal p3=30-60	1,62
07	Puyas de Raimondi p1=0-10	1,07
08	Puyas de Raimondi p2=10-30	0,99
09	Puyas de Raimondi p3=30-60	0,95

#### Conclusiones:

La muestras analizadas de Suelos CUMPLEN con los requisitos de documentos referenciales.

#### Nota:

Cualquier corrección y/o enmendadura anula al presente documento. (El informe sólo afecta a la muestra sometida a ensayo).



INIA  
ESTACIÓN EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO

Ing° JORGE SANHUA ROJAS  
Jefe Laboratorio Análisis  
SALCEDO

Los resultados son aplicables a esta muestra.

Rinconada de Salcedo s/n  
Puno, Puno, Perú

## Anexo E. Cálculo de carbono orgánico del suelo y dióxido de carbono

Código	Prof.	D	%CO	t C/ha	t CO <sub>2</sub> /ha
S1-h1-P1-pm1-D1	10	1.07	0.83	8.88	32.56
S1-h1-P2-pm2-D2	20	0.99	0.74	14.65	53.72
S1-h1-P3-pm3-D3	30	0.95	0.35	9.98	36.58
S1-h2-P1-pm4-D4	10	1.07	1.28	13.70	50.22
S1-h2-P2-pm5-D5	20	0.99	0.96	19.01	69.70
S1-h2-P3-pm6-D6	30	0.95	0.64	18.24	66.88
S1-h3-P1-pm7-D7	10	1.07	1.84	19.69	72.19
S1-h3-P2-pm8-D8	20	0.99	1.20	23.76	87.12
S1-h3-P3-pm9-D9	30	0.95	0.90	25.65	94.05
S2-h1-P1-pm1-D10	10	0.5	1.49	7.45	27.32
S2-h1-P2-pm2-D11	20	0.39	3.20	24.96	91.52
S2-h1-P3-pm3-D12	30	0.93	3.24	90.40	331.45
S2-h2-P1-pm4-D13	10	0.5	8.00	40.00	146.67
S2-h2-P2-pm5-D14	20	0.39	3.02	23.56	86.37
S2-h2-P3-pm6-D15	30	0.93	1.88	52.45	192.32
S2-h3-P1-pm7-D16	10	0.5	4.92	24.60	90.20
S2-h3-P2-pm8-D17	20	0.39	4.80	37.44	137.28
S2-h3-P3-pm9-D18	30	0.93	2.18	60.82	223.01
S3-h1-P1-pm1-D19	10	0.15	4.87	7.31	26.79
S3-h1-P2-pm2-D20	20	1.21	5.60	135.52	496.91
S3-h1-P3-pm3-D21	30	1.62	0.61	29.65	108.70
S3-h2-P1-pm4-D22	10	0.15	4.71	7.07	25.91
S3-h2-P2-pm5-D23	20	1.21	4.25	102.85	377.12
S3-h2-P3-pm6-D24	30	1.62	0.74	35.96	131.87
S3-h3-P1-pm7-D25	10	0.15	4.00	6.00	22.00
S3-h3-P2-pm8-D26	20	1.21	1.64	39.69	145.52
S3-h3-P3-pm9-D27	30	1.62	0.96	46.66	171.07

$$t\ C/ha = Prof. * D * \%CO$$

t C/ha = Densidad de carbono en el suelo (t C/ha)

Prof. = Profundidad del muestreo (cm)

D = Densidad (g/cm<sup>3</sup>)

%CO = Contenido porcentual de carbono orgánico en el suelo.

$$t\ CO_2/ha = C * K$$

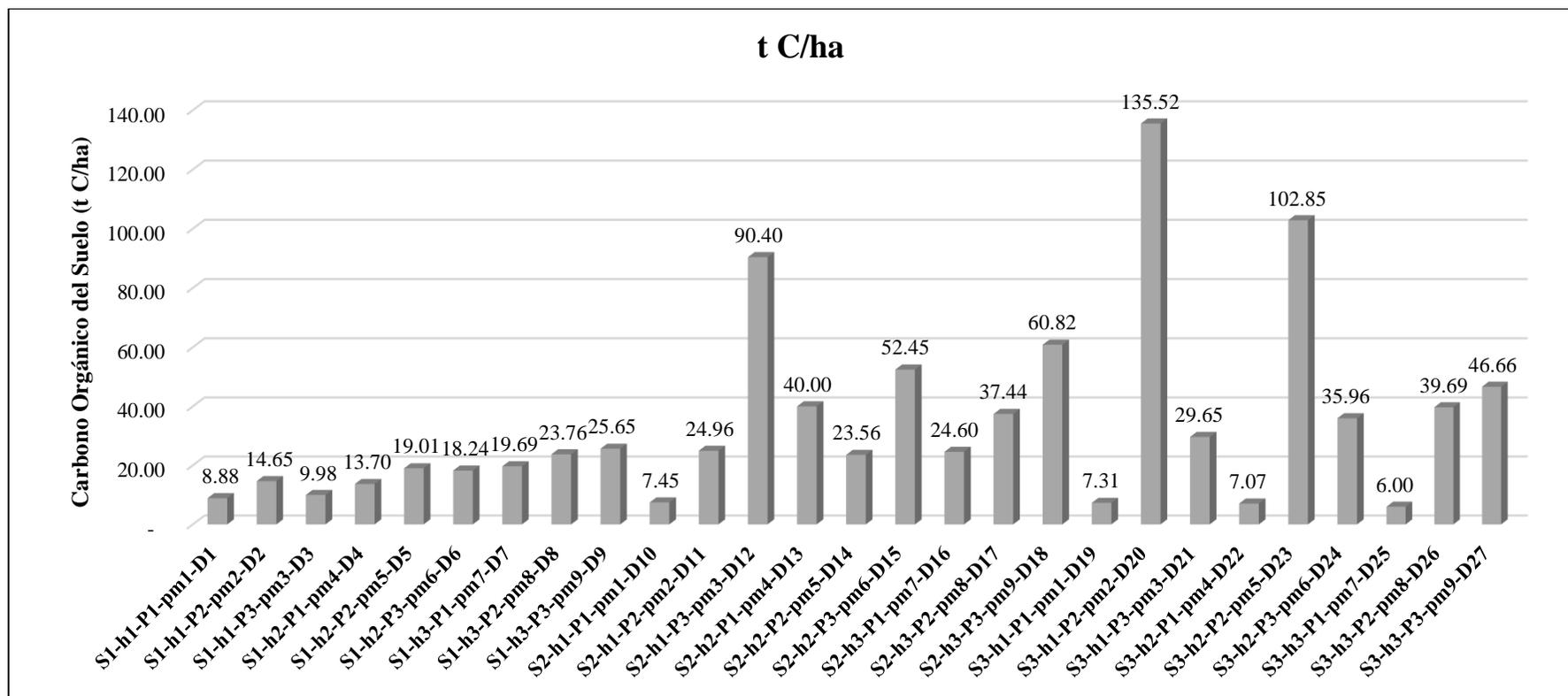
t CO<sub>2</sub>/ha = Toneladas de dióxido de carbono secuestrado en el suelo (t CO<sub>2</sub>/ha)

C = Contenido de carbono en el suelo (t C/ha)

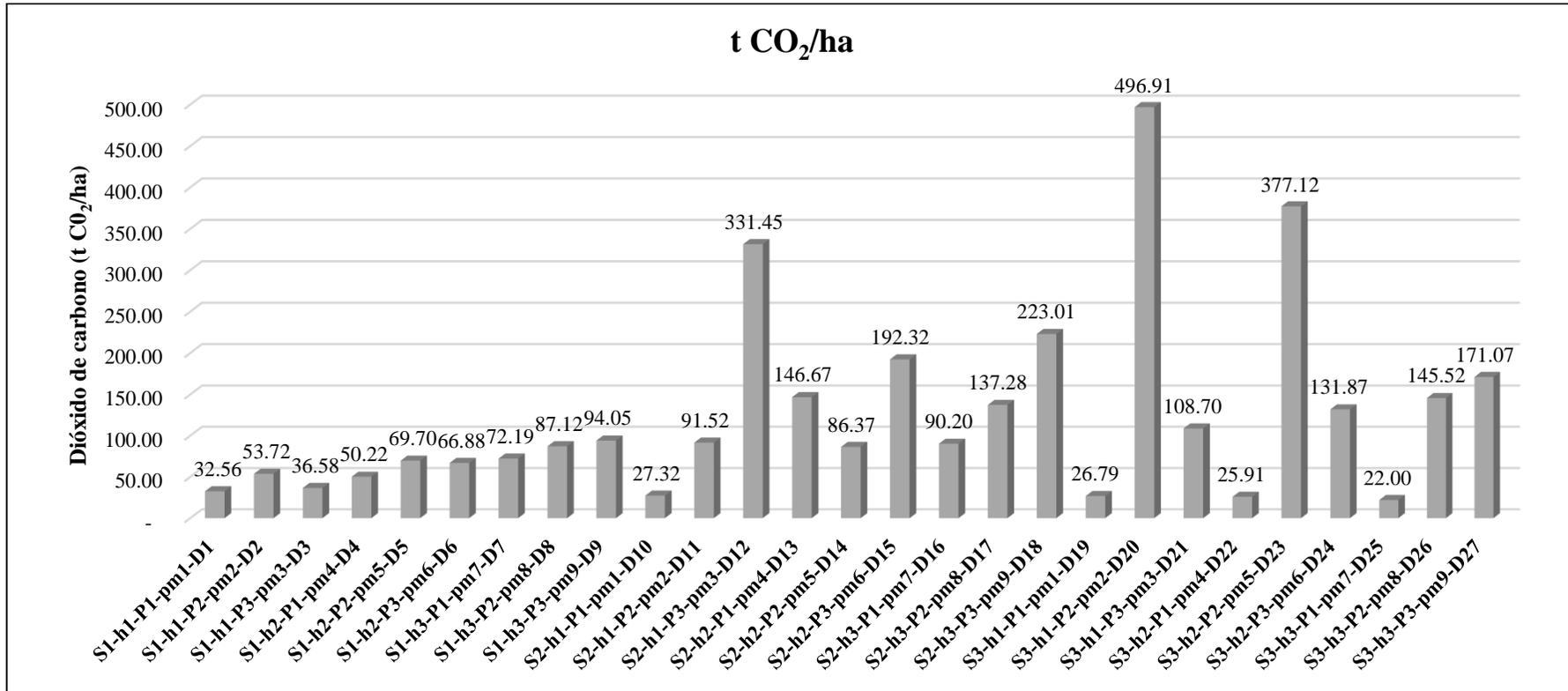
K = Factor de conversión (44/12)

Nota: Sumidero (S), Altura o repetición (h), Profundidad (P), Punto de muestreo (pm), Datos o muestras (27).

### Anexo F. Gráfico de metadatos para COS



Anexo G. Gráfico de metadatos para CO<sub>2</sub>

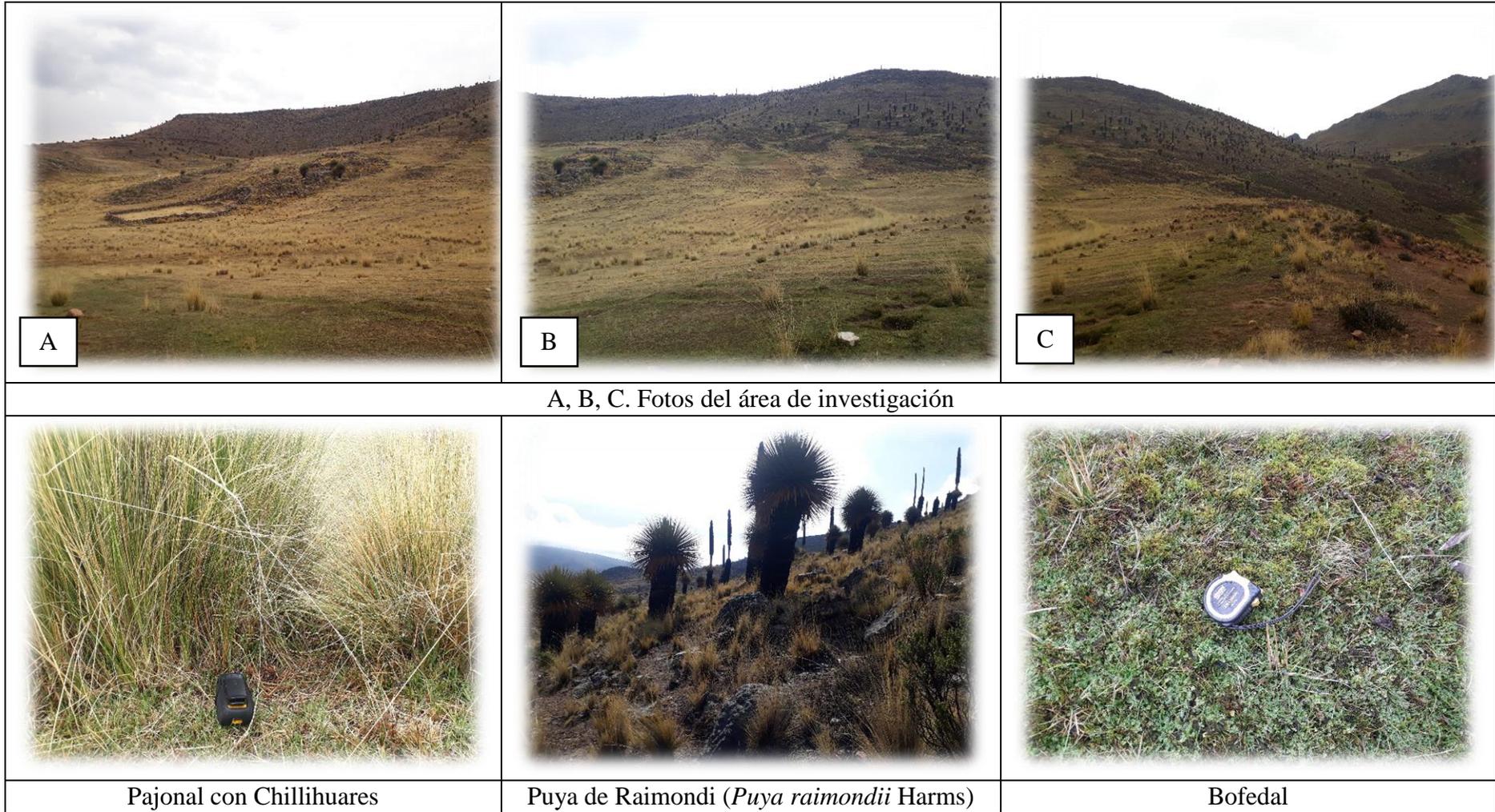


**Anexo H. Base de datos de los parámetros de sumideros y profundidades**

Código	Sumideros	Profundidades	%CO	t C/ha	t CO <sub>2</sub> /ha	pH	CE <sub>(1:1)</sub>	M.O.	P	K	Al <sup>+3</sup> + H <sup>+</sup>	N
S1-h1-P1-pm1-D1	I	A	0.83	8.88	32.56	4.82	0.11	1.43	4.1	203	0.20	0.06
S1-h1-P2-pm2-D2	I	B	0.74	14.65	53.72	4.98	0.04	1.27	5.3	103	0.20	0.04
S1-h1-P3-pm3-D3	I	C	0.35	9.98	36.58	4.65	0.02	0.61	5.5	111	0.60	0.03
S1-h2-P1-pm4-D4	I	A	1.28	13.70	50.22	4.56	0.09	2.21	2.2	354	0.65	0.08
S1-h2-P2-pm5-D5	I	B	0.96	19.01	69.70	4.44	0.05	1.66	3.0	157	0.85	0.10
S1-h2-P3-pm6-D6	I	C	0.64	18.24	66.88	4.44	0.04	1.10	5.3	194	1.05	0.05
S1-h3-P1-pm7-D7	I	A	1.84	19.69	72.19	4.02	0.23	3.17	7.6	298	0.90	0.13
S1-h3-P2-pm8-D8	I	B	1.20	23.76	87.12	4.61	0.04	2.07	15.1	184	0.45	0.07
S1-h3-P3-pm9-D9	I	C	0.90	25.65	94.05	4.65	0.03	1.54	25.2	154	0.40	0.10
S2-h1-P1-pm1-D10	II	A	1.49	7.45	27.32	4.86	0.25	2.57	7.6	73	0.10	0.12
S2-h1-P2-pm2-D11	II	B	3.20	24.96	91.52	4.57	0.24	5.52	4.3	79	0.15	0.23
S2-h1-P3-pm3-D12	II	C	3.24	90.40	331.45	4.86	0.15	5.59	2.2	118	0.10	0.28
S2-h2-P1-pm4-D13	II	A	8.00	40.00	146.67	4.69	0.15	13.79	4.2	311	0.30	0.34

S2-h2-P2- pm5-D14	II	B	3.02	23.56	86.37	4.61	0.08	5.21	3.3	153	0.60	0.23
S2-h2-P3- pm6-D15	II	C	1.88	52.45	192.32	4.65	0.05	3.25	3.0	132	0.50	0.18
S2-h3-P1- pm7-D16	II	A	4.92	24.60	90.20	4.44	0.13	8.49	3.4	204	0.50	0.32
S2-h3-P2- pm8-D17	II	B	4.80	37.44	137.28	4.48	0.10	8.28	3.8	158	0.50	0.31
S2-h3-P3- pm9-D18	II	C	2.18	60.82	223.01	4.52	0.05	3.75	3.3	149	0.90	0.16
S3-h1-P1- pm1-D19	III	A	4.87	7.31	26.79	5.54	0.36	8.39	4.7	91	0.10	0.31
S3-h1-P2- pm2-D20	III	B	5.60	135.52	496.91	5.20	0.56	9.65	2.2	85	0.10	0.34
S3-h1-P3- pm3-D21	III	C	0.61	29.65	108.70	4.74	0.09	1.06	2.1	82	0.15	0.05
S3-h2-P1- pm4-D22	III	A	4.71	7.07	25.91	4.74	0.11	8.11	2.2	134	0.25	0.26
S3-h2-P2- pm5-D23	III	B	4.25	102.85	377.12	4.78	0.08	7.33	3.1	99	0.25	0.25
S3-h2-P3- pm6-D24	III	C	0.74	35.96	131.87	4.99	0.06	1.27	1.4	81	0.20	0.06
S3-h3-P1- pm7-D25	III	A	4.00	6.00	22.00	4.65	0.14	6.90	3.0	156	0.80	0.26
S3-h3-P2- pm8-D26	III	B	1.64	39.69	145.52	4.48	0.04	2.84	3.4	72	1.25	0.08
S3-h3-P3- pm9-D27	III	C	0.96	46.66	171.07	4.40	0.03	1.66	2.6	77	1.25	0.06

Anexo I. Fotos de área de estudio



**Anexo J. Panel fotográfico**

		
<p>Perfil de suelo en Puyas de Raimonidi</p>	<p>Perfil de suelo en Pajonal con Chillihuares</p>	<p>Perfil de suelo en Bofedal</p>
		
<p>Perfil de 0 a 10 cm en Pajonal con Chillihuares</p>	<p>Área del mixto de sumideros</p>	<p>Muestreo para densidad aparente (Volumen)</p>

## Anexo K. Mapa de stocks de carbono sobre el suelo del Perú

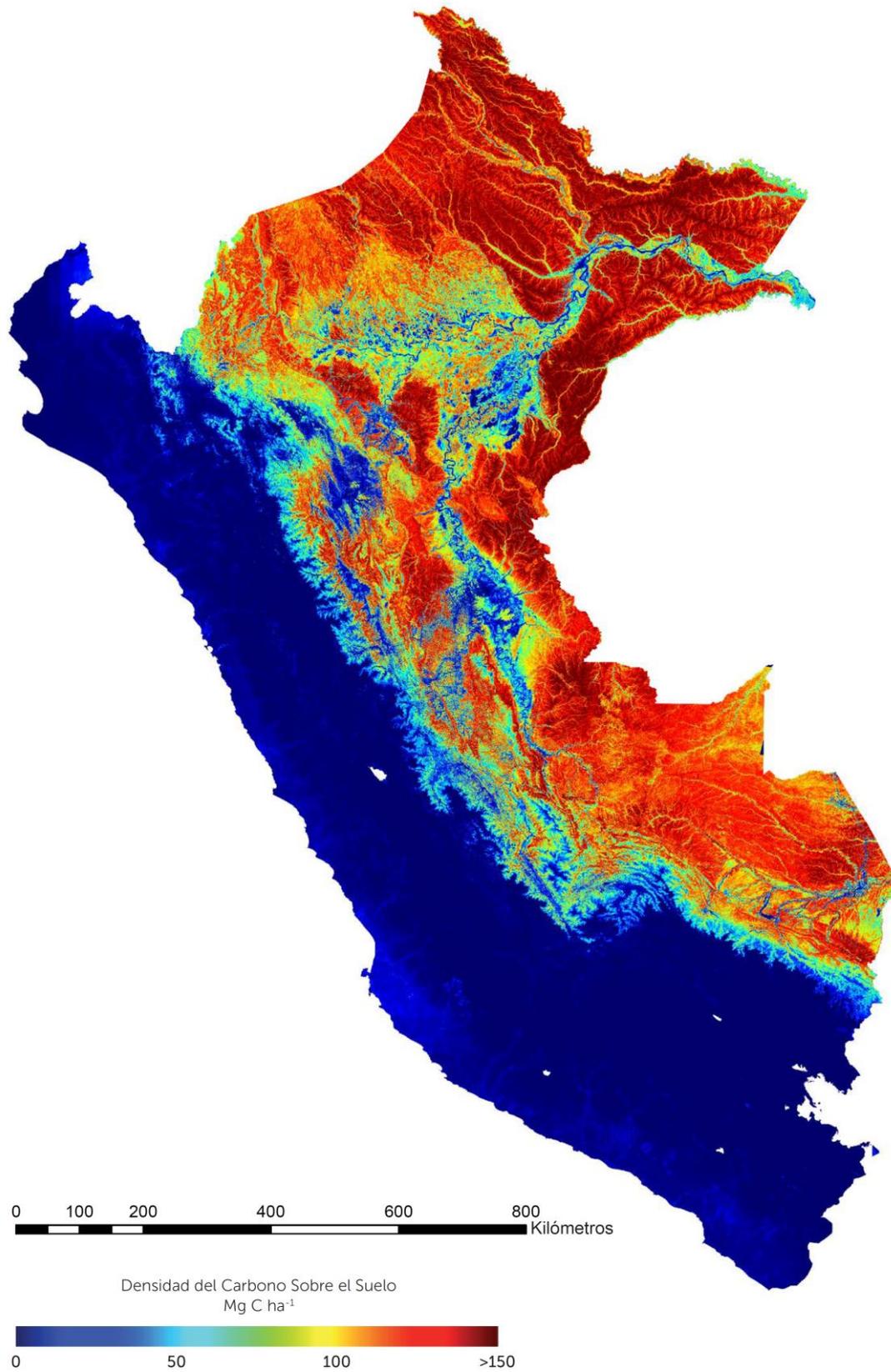


Figura 17. Mapa de stocks de carbono sobre el suelo con una resolución de una hectárea para el Perú  
Fuente: Asner et al (2014).

## Anexo L. Distribución de algunos ecosistemas altoandinos

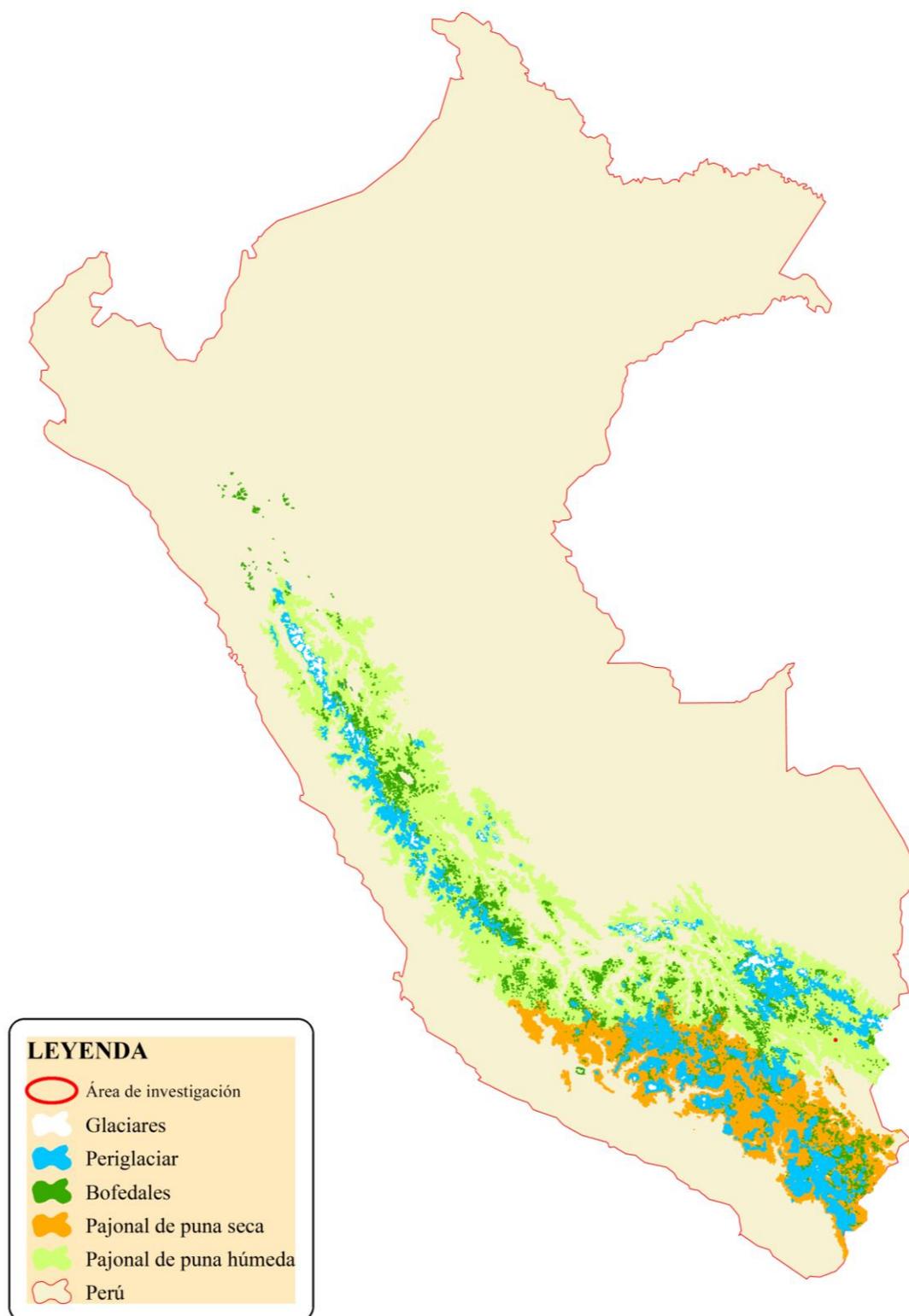


Figura 18. Distribución de ecosistemas altoandinos relacionados con los sumideros evaluados. Fuente: Adaptado de Geoservidor de MINAM (2019).

## Anexo M. Servicios ambientales de bofedales y opciones de respuesta basadas en el manejo de tierra

Servicios ambientales	Funciones	Ejemplos
Regulación de Gases	Regular la composición química atmosférica.	Balance CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> .
Regulación de Clima	Regular la temperatura global, precipitación y otros procesos climáticos locales y globales.	Regulación de gases de efecto invernaderos (Captura de Carbono).
Regulación de disturbios	Capacidad del ecosistema de dar respuesta y adaptarse a fluctuaciones ambientales.	Protección de sequías, respuesta del hábitat a cambios ambientales.
Oferta de agua	Almacenar y retener agua.	Provisión de agua proveniente de acuíferos.
Retención de sedimentos y control de erosión	Retención del suelo dentro del ecosistema.	La cobertura de bofedal previene la pérdida de suelo por viento. Almacenar de agua en los bofedales.
Refugio de especies	Hábitat para poblaciones residentes y migratorias.	Semilleros, hábitat de especies migratorias, locales.
Materia prima	Producción bruta primaria extractable de materias primas.	Producción de forrajes.
Recreación	Proveer oportunidades para actividades recreacionales.	Ecoturismo.
Cultural	Proveer oportunidades para usos no comerciales.	Estética, artística, educacional, espiritual, valores científicos del ecosistema.

Response options based on land management	
<i>in agriculture</i>	Improved management of: cropland, grazing land, livestock; Agro-forestry; Avoidance of conversion of grassland to cropland; Integrated water management
<i>in forests</i>	Improved management of forests and forest restoration; Reduced deforestation and degradation; Afforestation
<i>of soils</i>	Increased soil organic carbon content; Reduced soil erosion; Reduced soil salinisation
<i>across all/other ecosystems</i>	Reduced landslides and natural hazards; Reduced pollution including acidification; Biodiversity conservation; Restoration and reduced conversion of peatlands
<i>specifically for carbon dioxide removal</i>	Enhanced weathering of minerals; Bioenergy and BECCS
Response options based on value chain management	
<i>through demand management</i>	Dietary change; Reduced post-harvest losses; Reduced food waste
<i>through supply management</i>	Sustainable sourcing; Improved energy use in food systems; Improved food processing and retailing
Response options based on risk management	
<i>risk management</i>	Risk sharing instruments; Use of local seeds; Disaster risk management

Fuente: Crispin & Jimenez (2019) y Arneth et al (2019).