

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL



PROYECTO DE GRADO

**CUANTIFICACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO Y EVALUACIÓN DE LA
ACTIVIDAD FOTOSINTÉTICA EN SUELOS CON COBERTURA NATIVA EN
ZONAS ALTOANDINAS DE BOLIVIA**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL

POSTULANTE: VERÓNICA CONDORI TICONA

TUTOR: ING. PH. D. ROBERTO MIRANDA CASAS

COTUTOR: ING. MSC. GAVI ALAVI MURILLO

TRIBUNAL: ING. MSC. MARCELO GORRITY PORTILLO

TRIBUNAL: ING. PH. D. MAGALÍ GARCÍA CÁRDENAS

LA PAZ - BOLIVIA

2023



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

DEDICATORIA

A mi papá

Para mi primer maestro Florencio Condori Nina (†), por tus enseñanzas, por tu paciencia y dedicación, por tu entrega al enseñarme matemáticas, escritura y hasta a colorear. Gracias al entusiasmo que demostrabas al ver que tus hijos tendrían las oportunidades que tu no pudiste tener, esto mismo me inspiro, entre otras cosas a tomar el camino que hoy en día sigo. Por mostrarme de lo que es capaz el amor incondicional de un padre y de enseñarme aun en tu ausencia que puedo lograrlo. Para ti, que merecías estar presente en este momento, uno de los momentos de tu vida y la mía que tanto esperaste.

En un acto de reconocimiento a tu esfuerzo y compromiso con mi vida y mis metas, te dedico este proyecto. Hoy no puedo abrazarte físicamente, pero te abrazo con el alma.

De mí para ti hasta el cielo.

AGRADECIMIENTOS

El agradecimiento infinito a mí amado Dios, quien dirige el camino de mi profesión y de mi vida también.

Agradezco a mi madre, Carmen Ticoná, por no sólo estar presente en esta etapa de mi vida, sino por ofrecerme lo mejor en todo momento, y porque incluso en los momentos difíciles cuento con tu apoyo y tu presencia inigualable. Gracias por su confianza y por ser un ejemplo de honestidad, perseverancia y valentía. Tu impresionante dedicación, apoyo incondicional, palabras de aliento y amor invaluable me motivan a lograr mis objetivos y estoy segura que esto significa orgullo para ti y para mí también.

A mi familia por la confianza y cariño brindado en todo momento de mi vida.

A la Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ingeniería, por brindarme todo el conocimiento y la formación adquirida para lograr culminar mis estudios superiores.

Al laboratorio de medio ambiente y suelos del Instituto de Investigaciones Químicas y de Procesos (IIDEPROQ), por apoyo en análisis de muestras. A la coordinadora del proyecto manejo antropogénico de suelos Ph.D. Magali García, así también a mis tutores Ph.D. Roberto Miranda e Ing. Gavi Alavi, por sus sugerencias y dirección durante la ejecución del trabajo de investigación. A mis compañeros tesisistas y pasantes, por su apoyo para la toma de muestras y también por compartir momentos amenos y por su gran compañerismo demostrado a mi persona.

A todas las personas, amigos y mi novio, que me apoyaron directa e indirectamente para culminar mi trabajo de investigación y a quienes formaron parte de mi vida durante una carrera universitaria, mismas que sin conocerme me dieron su amistad y que han compartido conmigo en las buenas y en las malas.

RESUMEN

La captura de carbono a través de la fotosíntesis es uno de los procesos más significativos, en contraste con el efecto invernadero causado por algunos gases, entre ellos el CO₂. La biomasa de las especies vegetales y el suelo constituyen los sumideros de carbono más importantes en el mundo. En este entendido, la presente investigación tuvo como objetivo principal determinar la captura de carbono y evaluar la actividad fotosintética en áreas con cobertura nativa de zonas altoandinas de Bolivia. Para ello se consideraron tres localidades (Chojñapata, Calahuancani y Cota Cota), dentro de las cuales están presentes ecosistemas representativos con cobertura vegetal nativa (bofedal, pajonal, th'olar y pastizal). El registro de datos se realizó durante la época de transición de julio a diciembre. Se realizó la recolección de biomasa aérea, subterránea (raíces) y suelo para posterior evaluación. Para monitorear el comportamiento de la actividad fotoquímica en las especies vegetales se empleó el equipo FluorPen FP110, a través de la medición de parámetros de fluorescencia, como fluorescencia instantánea de clorofila (Ft) y el rendimiento cuántico del fotosistema II (Qy), considerando los diferentes escenarios climáticos bajo los cuales se encontraban.

En relación a los resultados se obtuvo el carbono capturado en la biomasa vegetal del pastizal 31,14 t C/ha, bofedal 24,13 t C/ha, pajonal 14,9 t C/ha y th'olar 10,05 t C/ha. Así también en el suelo del pastizal 207.17 t C/ha, bofedal 543.98 t C/ha, pajonal 408.40 t C/ha y th'olar 471.10 t C/ha. En cuanto al comportamiento de la actividad fotosintética se mostró un mínimo aumento con el transcurso de la temporada; además a través de correlaciones simples de los parámetros de fluorescencia con los factores climáticos se observó que un aumento de temperatura afectaría positivamente a la actividad fotoquímica de las plantas, el ecosistema con mayor actividad fotosintética es el pastizal. Así, las zonas altoandinas almacenan cantidades significativas de carbono y cuentan con características que naturalmente favorecen lo anterior. Por su lado, cabe mencionar que el bofedal, acorde a los resultados considerando vegetación y suelo, constituye uno de los mayores sumideros de carbono que por sus características apoya a la mitigación del cambio climático.

PALABRAS CLAVE

Sumidero de carbono, eficiencia fotosintética, vegetación andina, pastizal, bofedal, pajonal, th'olar.

ABSTRACT

Carbon capture through photosynthesis is one of the most significant processes, in contrast to the greenhouse effect caused by some gases, including CO₂. The biomass of plant species and soil constitute the most important carbon sinks in the world. In this understanding, the main objective of this research was to determine carbon capture and evaluate photosynthetic activity in areas with native cover in high Andean areas of Bolivia. For this, three localities were considered (Chojñapata, Calahuancani and Cota Cota), within which representative ecosystems with native vegetation cover (bofedal, pajonal, th'olar and grassland) are present. Data recording was carried out during the transition period from July to December. The collection of aerial, underground (roots) and soil biomass was carried out for subsequent evaluation. To monitor the behavior of photochemical activity in plant species, the FluorPen FP110 equipment was used, through the measurement of fluorescence parameters, such as instantaneous chlorophyll fluorescence (Ft) and the quantum yield of photosystem II (Qy), considering the different climatic scenarios under which they were found.

In relation to the results, the carbon captured in the plant biomass of the grassland was obtained 31.14 t C/ha, bofedal 24.13 t C/ha, pajonal 14.9 t C/ha and th'olar 10.05 t C /ha. Likewise, in the grassland soil 207.17 t C/ha, bofedal 543.98 t C/ha, grassland 408.40 t C/ha and th'olar 471.10 t C/ha. Regarding the behavior of photosynthetic activity, a minimal increase was shown with the course of the season; Furthermore, through simple correlations of fluorescence parameters with climatic factors, it was observed that an increase in temperature would positively affect the photochemical activity of plants; the ecosystem with the highest photosynthetic activity is the grassland. Thus, the high Andean areas store significant amounts of carbon and have characteristics that naturally favor the above. For its part, it is worth mentioning that the wetland, according to the results considering vegetation and soil, constitutes one of the largest carbon sinks that, due to its characteristics, supports the mitigation of climate change.

KEYWORDS

Carbon sink, photosynthetic efficiency, Andean vegetation, grassland, bofedal, pajonal, th'olar

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	ANTECEDENTES.....	2
2.1.	Planteamiento del problema	4
3.	OBJETIVOS.....	6
3.1.	Objetivo general	6
3.2.	Objetivos específicos	6
4.	JUSTIFICACIÓN	7
4.1.	Justificación técnica.....	7
4.2.	Justificación económica	7
4.3.	Justificación social	7
4.4.	Justificación ambiental	7
4.5.	Justificación institucional.....	8
5.	MARCO TEORICO	8
5.1.	Pradera nativa y su importancia.....	8
5.2.	Vegetación predominante en una cuenca altiplánica	9
5.2.1.	Bofedales	9
5.2.2.	Pajonales	10
5.2.3.	Th´olares	10
5.2.4.	Pastizales.....	11
5.3.	Fotosíntesis	11
5.4.	Captura de carbono.....	12
5.4.1.	Biomasa vegetal.....	13
5.4.2.	Carbono y materia orgánica en el suelo	14
5.5.	Actividad fotosintética medida por la fluorescencia	16
5.6.	Factores que influyen en la fotosíntesis	17
6.	MARCO METODOLÓGICO	18
6.1.	Diseño de investigación	18
6.1.1.	Enfoque de la investigación	18
6.1.2.	Tipo de investigación	18
6.2.	Muestreo, monitoreo y métodos	20
6.2.1.	Diversidad florística	20
6.2.2.	Carbono fijado en la biomasa vegetal aérea y radical	22

6.2.3.	Carbono fijado en el suelo superficial	24
6.2.4.	Monitoreo de la actividad fotoquímica de las especies vegetales	27
6.2.5.	Cambios en la actividad fotoquímica relacionados con variaciones de los factores climáticos.....	28
6.2.6.	Georreferenciación	30
6.2.7.	Época de muestreo	30
6.2.8.	Materiales	31
6.2.9.	Equipos	31
6.2.10.	Reactivos	32
6.2.11.	Análisis estadístico	32
7.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	34
7.1.	Diversidad florística.....	34
7.2.	Carbono fijado en la biomasa vegetal	37
7.2.1.	Biomasa radical y aérea.....	37
7.2.2.	Carbono capturado en la biomasa vegetal del área de estudio.	39
7.3.	Carbono fijado en el suelo.....	42
7.3.1.	Carbono orgánico capturado en el suelo.....	42
7.3.2.	Carbono de la biomasa microbiana del suelo	45
7.4.	Actividad fotosintética de la vegetación.....	48
7.4.1.	Variabilidad diurna	48
7.4.2.	Variabilidad por temporada	51
8.	CONCLUSIONES.....	65
9.	RECOMENDACIONES	67
10.	REFERENCIAS.....	69
11.	ANEXOS.....	80

Índice de tablas

Tabla 1. Valores de C y CO ₂ capturados en muestras de th'olas provincia Aroma.....	13
Tabla 2. Georreferenciación de los diferentes ecosistemas.....	30
Tabla 3. Correlaciones entre variables climáticas con Ft (Fluorescencia instantánea de la clorofila).....	51
Tabla 4. Correlaciones entre variables climáticas con Qy (Eficiencia Cuántica)	52

Índice de figuras

Figura 1 Flujograma de la metodología empleada para cuantificar la captura de carbono en vegetación nativa en zonas andinas de Bolivia (Ft: fluorescencia instantánea de la clorofila, Qy: rendimiento cuántico del fotosistema II)	19
Figura 2 Esquema de los métodos utilizados en el desarrollo del proyecto de investigación, que busca la cuantificación de captura de carbono y evaluación de la actividad fotosintética en suelos con cobertura nativa en zonas altoandinas de Bolivia	20
Figura 3 Ilustración del método del cuadrante utilizado para la evaluación de la composición florística en el ecosistema pastizal.....	22
Figura 4 Extracción de un Individuo de la especie Baccharis tola Phil	23
Figura 5 Pesaje de la masa seca de la muestra para la determinación del carbono capturado en la biomasa vegetal.....	24
Figura 6 Muestreo en el ecosistema th'olar para unos horizontes de hasta 30 cm de profundidad en el suelo	25
Figura 7 Titulación con sulfato ferroso amoniacal empleado en el método de Walkley – Black para la determinación del carbono orgánico	26
Figura 8 Fumigación con cloroformo de las muestras a analizar para la determinación del carbono de la biomasa microbiana	27
Figura 9 Monitoreo de los parámetros de fluorescencia con el equipo FluorPen FP 10.....	28
Figura 10 Porcentajes de cobertura de las especies vegetales presentes, correspondientes a los cuatro ecosistemas en las diferentes localidades altoandinas	34
Figura 11 Relación de biomasa radical y aérea (biomasa total) generada por ecosistema.....	37
Figura 12 Captura en la biomasa de los cuatro ecosistemas estudiados en términos de.....	39
Figura 13 CO ₂ Capturado en la biomasa de cada especie de los ecosistemas monitoreados	41
Figura 14 Comportamiento del carbono capturado por superficie en el suelo a diferentes profundidades con relación al contenido de humedad, densidad aparente, contenido de carbono.....	43
Figura 15 Comportamiento de carbono en el suelo con relación a carbono microbiano en los diferentes ecosistemas en una profundidad de 0 a 20 cm.....	46
Figura 16 Comportamiento de las medias de la variable Ft (fluorescencia instantánea de la clorofila) a lo largo del día en el ecosistema pastizal	49
Figura 17 Comportamiento de las medias de la variable Qy (rendimiento cuántico del fotosistema II) a lo largo del día en el ecosistema pastizal	50

Figura 18 Fluorescencia instantánea de la clorofila (Ft) con relación a los factores climáticos en los diferentes ecosistemas.....54

Figura 19 Rendimiento cuántico (Qy) con relación a los factores climáticos en los diferentes ecosistemas.56

Figura 20 Desarrollo de Ft (fluorescencia instantánea de la clorofila) durante el tiempo de muestreo para los diferentes ecosistemas.....59

Figura 21 Desarrollo de Qy (rendimiento cuántico) durante el tiempo de muestreo para los diferentes ecosistemas59

Figura 22 Comportamiento de la captura de carbono en biomasa vegetal y suelo, y los parámetros de fluorescencia Ft (fluorescencia instantánea de la clorofila) y Qy (rendimiento cuántico del fotosistema II), relacionados con la dinámica fotosintética de las especies estudiadas en los diferentes ecosistemas62

Lista de Anexos

Anexo A Imagen satelital - Ecosistema bofedal	80
Anexo B Imagen satelital - Ecosistema pajonal.....	81
Anexo C Imagen satelital - Ecosistema th'olar.....	82
Anexo D Imagen satelital - Ecosistema pastizal	83
Anexo E Gráfico de porcentaje de especies registradas por ecosistema.....	84
Anexo F Especies de ecosistema bofedal: Localidad Chojñapata	86
Anexo G Especies de ecosistema pajonal Localidad Chojñapata.....	90
Anexo H Especies de ecosistema th'olar. Localidad Calahuancani.....	93
Anexo I Especies de ecosistema pajonal. Localidad Cota Cota.....	96
Anexo J Registro de dióxido de carbono capturado en la biomasa total.....	98
Anexo K Biomasa generada en la parte aerea de las especies presentes en los ecosistemas	99
Anexo L Biomasa generada en la parte radical de las especies presentes en los ecosistemas	100
Anexo M Carbono capturado por especie.....	101
Anexo N Resultados de la prueba carbono orgánico suelo y otros parámetros	102

CUANTIFICACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO Y EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD FOTOSINTÉTICA EN SUELOS CON COBERTURA NATIVA EN ZONAS ALTOANDINAS DE BOLIVIA

1. INTRODUCCIÓN

La vegetación a través de la fotosíntesis regula la absorción de CO₂, libera oxígeno y el carbono es retenido en la planta para formar biomasa (Carvajal et al., 2014). Debido a la acción de la fotosíntesis, que utiliza el carbono atmosférico, parte de este carbono llega al suelo y puede estabilizarse por períodos de hasta miles de años. Dadas estas consideraciones, el suelo en conjunto con las plantas puede contribuir en mayor o menor medida a los esfuerzos para mitigar el cambio climático (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2015).

Por consiguiente, la recuperación de ecosistemas fundamentales en la tierra y la utilización sustentable del suelo en regiones rurales y urbanas tienen la posibilidad de ayudarnos a mitigar el calentamiento global y a adaptarnos a este (EEA, 2015). Adicionalmente en un estudio sobre la sostenibilidad agropastoril en el altiplano boliviano, se observó que tanto en tierras con cultivos y especies nativas para un sitio de investigación, las condiciones climáticas, el suelo, la ganadería y el ser humano pueden interactuar de diferentes formas y producir impactos diferentes en cada área (Coppock y Corinne, 2001). El Altiplano boliviano cuenta con sistemas agrícolas que respetan periodos de descanso, aunque en algunas regiones esta tecnología ancestral está siendo sustituida por producción continua. Conocer sobre la importancia de los ecosistemas agroforestales y su manejo sostenible es de prioridad para cada región (Taboada et al., 2014).

Los estudios sobre fotosíntesis como proceso de fijación de carbono aportan información sobre sistemas de uso de la tierra y las consecuencias en áreas degradadas o en proceso de degradación como consecuencias de la intervención, lo cual se produce en el tiempo de uso principalmente, conocidos por los agricultores (Maquera, 2017). Ahora bien, el presente estudio pretende obtener información sobre la capacidad de fijación de dióxido de carbono (CO₂), principalmente en especies nativas, en tres comunidades con ecosistemas representativos de la zona alto-andina del departamento de La Paz.

2. ANTECEDENTES

Dentro de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) que integra el desarrollo económico a nivel mundial muestra desigualdades sociales, económicas y la degradación ambiental, que son los desafíos a ser superados hasta 2030. Bolivia desde el año 2013 desarrolla y plantea los 13 pilares de “Bolivia libre y Soberana” contemplados en la denominada “Agenda Patriótica 2025”, que se constituye en la herramienta para desarrollar actividades dentro del paradigma del “Vivir Bien”, estas políticas públicas en lo referente al cambio climático y calentamiento global brindan oportunidad de desarrollar proyectos que permitan mitigar estos cambios climáticos (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018).

En el marco del proyecto “Influencia antropogénica sobre las tasas de erosión en una cuenca típica para desarrollar estrategias para reducir la degradación de las tierras en los andes bolivianos”, bajo contexto de mitigación y adaptación al cambio climático, y de explorar opciones para la sostenibilidad del ciclo del carbono en zonas altoandinas; la Universidad Mayor de San Andrés desarrolla investigaciones que permiten y tienen por objetivo aportar información científica mediante sus diferentes institutos de investigaciones.

Cuando los ecosistemas se gestionan o protegen bajo compromisos de reducción de emisiones de GEI (gases de efecto invernadero), la cantidad de carbono que se puede liberar o almacenar y bloquear en un área determinada se representa en una evaluación adecuada de la biomasa en esos ecosistemas (Schlegel, 2001). Un ecosistema distintivo del altiplano andino son los humedales o bofedales, que son sumideros potenciales de carbono, por lo que se necesita más investigación sobre emisiones de GEIs (dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O)). Evaluar las entradas y salidas de GEIs del recurso suelo, contribuye a la conservación y protección de los ecosistemas y proporciona estrategias para mitigar los impactos del cambio climático (Chang y Mandarachi, 2021). Así también, el suelo sirve como fuente o sumidero de GEIs.

El suelo es importante para el sistema climático y es el segundo mayor sumidero de carbono, después de los océanos. Asimismo, de acuerdo con la zona, el calentamiento global podría ocasionar un más grande almacenamiento de carbono en las plantas y en el suelo debido al incremento de vegetación o más grandes emisiones de carbono a la atmósfera (EEA, 2015). Dentro de este marco diferentes estudios referidos a la composición de carbono en el

suelo permiten conocer la cantidad de este elemento como resultado de la acción fotosintética y la formación de biomasa. El método propuesto por Walkey y Black en 1934, permite la determinación de carbono oxidable (Cox) en muestras de suelo es uno de los más empleados, actualmente ha sufrido numerosas modificaciones (INTA, 2010). Posterior a ello, Walker, en 1947 publica un análisis crítico del método, basado en la amplia aceptación que había tenido, defendiendo la estabilidad del ensayo cuando se respetan las condiciones del procedimiento y reconociendo la necesidad de usar un factor de recuperación para estimar el CO₂ (Carreira, 2014).

El intercambio de estos gases entre el suelo y la atmósfera está influenciado por varios factores como el uso y manejo de la tierra, la temperatura y la precipitación (Salinas, 2018). De modo similar estudios realizados sobre el ciclo del carbono en el altiplano boliviano acerca de la relación entre el intercambio de carbono y la biósfera indican que “Un aumento del CO₂ atmosférico podría contribuir al aumento de la producción vegetal durante el descanso y entonces en la reducción de la duración del descanso en el Altiplano boliviano” (Saugier y Pontailier, 2006).

Actualmente, en el altiplano se practica el descanso de tierras con el objetivo de recuperar la fertilidad de los suelos, pero el terreno se utiliza para el pastoreo y para la extracción de leña. Durante este tiempo, la sucesión secundaria genera cambios en la estructura y composición de la vegetación, a medida que distintas especies colonizan el área puesta en descanso o terrenos abandonados y van cambiando su abundancia (Ortuño y Sarmiento, 2006).

A pesar de existir la Ley N° 3358 como ejemplo a nivel departamental, que data del 21 de febrero de 2006, que declara la necesidad de recuperación, preservación, conservación y aprovechamiento sostenible de las praderas nativas ubicadas en el altiplano, para mejorar y recuperar la disponibilidad de forrajes nativos, existe la necesidad de dar a conocer las razones científicas por las que es importante el papel de las praderas nativas como sumideros de carbono que reducen el alcance de los efectos del cambio climático y así también contribuyen a la conservación de los ecosistemas. Dado que las recientes emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, son las más altas de la historia,

impulsadas en gran medida por el crecimiento económico y poblacional, el impacto de los seres humanos en el sistema climático es claro (IPCC, 2014).

Sanfuentes et al. 2012, proponen que los entornos alpinos son particularmente vulnerables al calentamiento global. Las interacciones de variables como la escasez de agua y las condiciones de temperatura ambiental pueden limitar el intercambio de gases en las regiones alpinas. Por las características de clima y altitud (>3800 m.s.n.m.), el altiplano boliviano presenta escasa cobertura vegetal. El nivel de evapotranspiración es más alto que en la zona cercana a la influencia del Lago Titicaca en la que se registra clima frío húmedo. Asimismo, la agricultura está favorecida por los niveles de radiación solar con promedios de 533 cal/cm²-día, por las características geográficas y climáticas. Estos datos nos sirven de referencia para estudiar la fotosíntesis, cantidad de energía absorbida y transformada en materia vegetal (Paz y Gonzales, 2007).

2.1. Planteamiento del problema

La información sobre actividad fotosintética de especies altiplánicas es escasa, estas pueden contribuir al secuestro de carbono; que, si no se secuestra, contribuirá al ciclo iterativo del cambio climático. Dentro de esta problemática se menciona la indagación sobre calentamiento global y uso de la tierra en los trópicos, el cual se enfoca principalmente en estudiar el impacto de la deforestación y el uso del suelo en las emisiones de gases de efecto invernadero y ciclo del carbono. Así, algunos estudios intentan cuantificar el potencial del uso sustentable de la tierra, para capturar y acumular carbono en los ecosistemas tropicales (Kanninen, 2003). Por lo tanto, comprender las reservas globales actuales de CO₂ y su distribución espacial es esencial para proporcionar información a múltiples partes interesadas (por ejemplo, agricultores, formuladores de políticas, usuarios de la tierra). De esta manera hacer un uso óptimo de las tierras accesibles y brindar las mejores oportunidades de mitigación y habituación al calentamiento global, además garantizar la producción de alimentos y el abastecimiento de agua suficiente (FAO, 2017).

Por un lado, los bosques andinos proporcionan y protegen fuentes de alimento, agua y energía para más de 50 millones de personas, sin embargo, los cambios ambientales globales, incluida la deforestación, el crecimiento de la población y el cambio climático amenazan la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas andinos (La Agencia Iberoamericana para la

Difusión de la Ciencia y la Tecnología, 2021). Por su parte, el cambio climático en el Altiplano boliviano es cada vez más visible debido a impactos ambientales y anomalías climáticas como la desertificación de suelos, escasez de agua y pérdida de biodiversidad que están provocando cambios climáticos afectando la vegetación del sitio (Mayta, 2016). En el Altiplano boliviano, sin embargo, los pastizales nativos son la principal fuente de alimento para ovejas, ganado vacuno, camélidos y otros. También, se estima que más del 98% de los pastizales de montaña están compuestos por especies nativas y el 2% por especies forrajeras introducidas. A pesar de la importancia de este recurso vegetal, el conocimiento disponible es muy pobre, el manejo es tradicional y conduce al sobrepastoreo de los pastizales (Ayala y Aranda, 1999, citado por Quispe, 2019).

En este sentido y por el potencial de secuestro de carbono por parte de estos ecosistemas, estudios concluyen que los sistemas de labranza mínima y agricultura de conservación pueden traer beneficios ambientales entre ellos, considerándose como alternativa para la fijación de carbono. Obteniendo resultados para muestras de biomasa en parcelas de 0,25 m², bajo condiciones controladas en laboratorio, se encontró la relación de materia seca y húmeda, la concentración de carbono total llegó a 149,70 t/ha de CO₂ bruto en el maíz, y en el suelo 248,732 t/ha de carbono (Quito, 2018).

Con relación a los ecosistemas de pastura, algunos estudios indican que la composición de la vegetación del altiplano puede variar significativamente de un año a otro, debido a las variaciones extremas de las condiciones climáticas y muy localmente de un evento lluvioso a otro (Hervé y Beck, 2006). Bajo este entendido, Saugier (2006) indicó que las consecuencias sobre la fotosíntesis en el altiplano boliviano se debe a los cambios globales, mismos que podrían modificar las condiciones de crecimiento de especies cultivadas, como la papa o la quinua, así como de las especies espontáneas que colonizan el suelo en descanso. Sobre el mismo contexto, el estudio midió la fijación de carbono de algunas especies claves de la puna boliviana con la finalidad de predecir el comportamiento futuro de estas especies frente a un aumento de la concentración de CO₂ atmosférico, los valores obtenidos son muy elevados, particularmente para los arbustos como *Parastrephia* y *Baccharis*, que presentan una fotosíntesis netamente más elevada que la de la especie

cultivada estudiada, la quinua. Tales mediciones se efectuaron en marzo 2001 al final de una estación de lluvias particularmente abundante, con un suelo todavía muy húmedo.

Por todo lo expuesto previamente, el presente estudio busca cuantificar la captura de carbono por especies nativas en áreas con mínima intervención antropogénica. Asimismo, evaluar su actividad fotosintética durante el período de transición entre la estación seca y el inicio de las lluvias. Para tal caso, se plantean las siguientes preguntas de investigación:

¿Cuánto carbono capturan los ecosistemas altoandinos y como se desenvuelve la actividad fotosintética bajo el escenario climático reinante?

- ¿Qué característica tiene la vegetación presente en estas áreas?
- ¿Cuánto carbono llevo a capturar estas especies en sus componentes?
- ¿Cuánto carbono capturo el suelo de estos ecosistemas?
- ¿Cómo influyen las condiciones climáticas en el desarrollo de la actividad fotosintética?

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Determinar la captura de carbono y evaluar la actividad fotosintética de la vegetación en suelos con cobertura nativa de zonas altoandinas de Bolivia.

3.2. Objetivos específicos

- 1) Determinar la diversidad florística de especies nativas en suelos del área de estudio.
- 2) Determinar la cantidad carbono fijado en la biomasa vegetal aérea y radical generada en las especies nativas del área de estudio.
- 3) Estimar el carbono fijado en el suelo superficial donde se encuentran las especies nativas.
- 4) Describir cambios en la actividad fotoquímica relacionados con variaciones de los factores climáticos.

4. JUSTIFICACIÓN

4.1. Justificación técnica

El presente trabajo permitirá conocer el potencial de la flora nativa y el suelo para la captura de carbono en una cuenca del altiplano. Esta absorción permite la mitigación de efectos de cambio climático; permitiendo a largo plazo el uso sostenible de los suelos de praderas nativas en regiones altoandinas, a su vez permite brindar sustento científico para la protección y conservación de las diferentes especies de flora nativa en sus diferentes ecosistemas. Así mismo el presente trabajo de investigación proveerá información para futuras investigaciones sobre las relaciones de las condiciones climáticas y los procesos de fotosíntesis, absorción de la energía lumínica en condiciones de los ecosistemas altoandinos y la eficiencia de estos como sumideros de carbono que permiten mitigar los efectos del calentamiento global.

4.2. Justificación económica

Económicamente este tipo de estudios contribuye con información para la gestión de uso de suelo y, por lo tanto, generación de ingresos económicos sostenibles en el tiempo, siendo que el factor suelo está directamente asociado a la actividad y productividad agrícola y pecuaria.

4.3. Justificación social

Según (EEA, 2015), las actividades humanas están produciendo un exceso de gases de efecto invernadero y en contraposición, los ecosistemas nativos están almacenando el carbono de la atmósfera en la biomasa y el suelo. En este sentido, el presente estudio permitirá conocer el potencial de captura de CO₂ como importante componente de estos Gases de Efecto Invernadero (GEI) y permitirá socializar información sobre la importancia del manejo adecuado de las praderas nativas para un desarrollo económico sustentable en el tiempo.

4.4. Justificación ambiental

La fijación de carbono en el suelo y los sistemas vegetales son un servicio ecosistémico que cumple funciones muy importantes para el bienestar humano y el equilibrio

con el medio ambiente (Centro de Investigaciones Ecológicas y Aplicaciones Forestales, 2016), además de reconocer la importancia de vegetación nativa altoandina y conocer los mecanismos de resistencia que permiten sus adaptaciones a condiciones ambientales adversas. Así mismo existe la posibilidad para los países como el nuestro, la de utilizar la acción de los sistemas agrícolas en descanso y sistemas agroforestales, como sumideros de carbono para reducir sus emisiones. Pequeñas acciones permiten logros locales que suman y contribuyen a reducir el efecto invernadero.

4.5. Justificación institucional

La evaluación de la captura de carbono en praderas nativas del altiplano aporta conocimientos sobre el comportamiento de praderas nativas con diferentes condiciones climáticas en época de transición, de igual manera permite conocer datos sobre la capacidad de ecosistemas como sumideros de carbono. Dicho en otras palabras, la investigación permite la generación de información para tomadores de decisión incluido agricultores, autoridades que les apoyen en la gestión de estos recursos y prevención de situaciones adversas empeoradas por el cambio climático y la presión a ecosistemas naturales. Aquellos agricultores informados serán capaces de prevenir situaciones adversas, así también conocer la dinámica del flujo neto de carbono entre la vegetación y la atmósfera, o lo que es lo mismo la cuantificación de su emisión y captura.

Los proyectos financiados a través del Instituto de Investigaciones de la Universidad a través del IIDEPROQ (Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos) contribuyen a través de esta investigación, al conocimiento del comportamiento de praderas nativas respecto de su capacidad de absorción de CO₂.

5. MARCO TEORICO

5.1. Pradera nativa y su importancia

Bolivia es un país con gran diversidad de praderas nativas, que son de importancia económica, medioambiental y cultural, por resguardar la biodiversidad para el uso sostenible de agricultura y ganadería (Padilla & Ticona, 2018). Los Campos Nativos de Pastoreo (CANAPAS), son praderas donde la vegetación consiste principalmente de pastos, hierbas y

arbustos nativos, cuya vegetación ha sido conformada en forma natural y que proporciona una cubierta de forraje que sirve de alimento en el pastoreo del ganado (Genin y Alzerreca, 1995).

De acuerdo a Demanet (2014), las praderas, son ecosistemas constituidos por especies naturales (nativas) y naturalizadas: Las especies endémicas o nativas, son aquellas que se encuentran dentro de su área de distribución natural u original (histórica o actual), acorde con su potencial de dispersión natural; sin la ayuda o intervención del ser humano y forma parte de las comunidades bióticas naturales del área”. Ahora bien, las praderas nativas se presentan distribuidas en la zona andina de Bolivia con marcadas diferencias en sus componentes vegetales en respuesta a variaciones de altitud, manejo, suelos, topografía y clima. En esta región han evolucionado diferentes comunidades vegetales en respuesta a condiciones edafoclimáticas específicas formando diferentes tipos de praderas (Alzerraca, 1992).

5.2. Vegetación predominante en una cuenca altiplánica

La vegetación predominante en una cuenca altiplánica es un tipo de pastizal, que se desarrolla en laderas altas con suelos pedregosos; en estos lugares predominan los pajonales con macollos altos de *Festuca dolichophylla*, *Jarava leptostachya*, varias especies de *Nassella* (*N. brachyphylla* “(flecha)”, *N. mexicana*, *N. mucronata*, *N. meyeniana*), *Eragrostis lurida*, *E. virescens* y las “th’olas”, que son arbustos de diferentes especies de *Baccharis*, por ej. *Baccharis tola var. Incarum* (Beck et al., 2015).

Otro tipo de formación vegetal, muy característico en el piso andino superior, son los bofedales o turberas andinas de altura densa, y las comunidades vegetales que las conforman albergan especies que son comunes sólo en este tipo de hábitat, como por ejemplo los cojines de juncáceas, *Distichia muscoides* y *Oxychloe andina*, conocidos localmente como “*kunkuna*” y “*ork’o paco*”. (Moya, Meneses, y Sarmiento, 2017).

5.2.1. Bofedales

Los bofedales se tratan de ecosistemas con áreas dispersas y discontinuas, los cuales, son semiacuáticos clasificados dentro de humedales (Meneses, *et al*, 2014). Tienen importantes roles dentro de los sistemas altoandinos, con el almacenamiento de agua permiten el desarrollo de vegetación diversa y de importancia mundial; su estructura y dinámica están

sometidas a diferentes factores; tales como latitud, altitud, temperatura, precipitación, cantidad de agua que reciben, aridez del suelo y el efecto modificador que ocasiona el hombre. Los mismos pueden ser positivos o destructivos al mismo (Pacheco, 1998, como se cita en Ramos, 2011).

Un bofedal se trata de un humedal de altura, y se considera una pradera nativa poco extensa con permanente humedad. Según Loza, Meneses, y Anthelme, (2015), quienes citan a Tellería et al. (2006), aseveran que los bofedales, en comparación con otras formaciones vegetales típicas de alta montaña poseen una gran diversidad biológica tanto a nivel de endemismo (plantas, aves, anfibios, peces, miró crustáceos).

5.2.2. Pajonales

Es un tipo de pradera transicional, en la que llegan a ser dominantes las gramíneas plurianuales resistentes a la quema y el pastoreo, plantas como la *Stipa ichu* y *Festuca orthophylla*. Esta mezcla favorece al pastoreo de las forrajeras efímeras en la época de lluvias y de los arbustos en la época seca (Genin y Alzerreca, 1995). De la misma manera los Pajonales son praderas con predominio de: festuca y otras gramíneas de hojas duras y envueltas, que son gramíneas de escaso valor forrajero para los ovinos e importantes para las llamas. Se ha observado que los suelos sobre los que se desarrollan son pobres, sueltos y con un alto porcentaje de arena. Estas praderas a menudo se queman para inducir el rebrote y el pastoreo resultante (Ancasi, 2012).

5.2.3. Th'olares

Las CANAPAS del tipo th'olar, son comunidades de plantas compuestas por pastos, hierbas y arbustos leñosos (th'olar) que crecen en los campos sin haber sido sembrados, están muy bien adaptados al medio y proporcionan forraje y protección al ganado doméstico y fauna silvestre. La tola al ser una planta de altura (3000-4500 m.s.n.m.) está distribuida en todo el altiplano. Los th'olares pueden ser puros o asociados, los puros llamados así porque se observa mucha más th'ola que otros pastos, en cambio los th'olares asociados comparten dominancia con otras especies como el th'olar-irual, tolar-chijial, tolar-kaillar o el tolar-kotal. (PNUD, 2002).

Los th'olares se tratan de ecosistemas de gran importancia en las zonas altiplánicas (central, norte y sur), debido a que económicamente son la base de ganadería y agricultura; sin embargo, a nivel medioambiental “mitiga los efectos del cambio climático mediante la absorción de CO₂, y resguarda la biodiversidad de la región” (Cruz y Huaycho, 2018). De igual manera mencionan que estudios realizados por el PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo) indican que los th'olares “son importantes asimiladores de CO₂ que mitigan los efectos de cambio climático y que sin la th'ola no habría hábitat apropiado para el crecimiento de otras especies”

5.2.4. Pastizales

El pastizal, es un término aplicado a tierras de pastoreo exclusivamente con vegetación natural de baja productividad y de uso ganadero extensivo. Estas áreas cubiertas por una vegetación herbácea donde predominan gramíneas, ciperáceas y rosáceas, varían en su composición de acuerdo a la humedad, exposición solar y características edafológicas como textura y contenido de materia orgánica (Astorga, 1987). Al cubrir casi 39 millones de km² (aproximadamente 25 % de la superficie continental de la Tierra), los pastizales representan uno de los ecosistemas más extensos del mundo y proporcionan numerosos servicios ambientales (D'atri, 2007). También cabe recalcar que se considera como pastizal natural a todas las tierras no cultivadas, estas incluyen los pastizales naturales, pero también las sabanas, los campos bajos y húmedos dominados por gramíneas y plantas semejantes, adecuadas para el pastoreo, así con ciertas comunidades de arbustos, hierbas y chaparrales (Alzerraca H. , 1987)

5.3. Fotosíntesis

La fotosíntesis es un proceso biológico de foto absorción y conversión de energía, y el otro proceso de foto asimilación de los elementos constituidos por la materia orgánica (C, H, O, S, etc.). La energía luminosa es absorbida por biomoléculas fotosensibles y transformada en una forma de energía bioquímica estable. (Rivas, 2013). Asimismo, este proceso aprovecha la energía de onda corta del espectro visible (PAR) para conducir una serie de reacciones químicas que resulta en la fijación de CO₂ en los carbohidratos (monosacáridos) y en liberación de O₂ como subproducto. La radiación fotosintéticamente activa o radiación PAR

es la parte de la luz solar en el rango de radiación de 400-700 nm que promueve la fotosíntesis. La emisión de PAR se expresa como densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD), el número total de fotones de 400 a 700 nm por superficie y tiempo (LabFerrer, 2012). La ecuación química de la fotosíntesis es:



Agua + Dióxido de Carbono → Oxígeno + Glucosa

“El dióxido de carbono asimilado en órganos fotosintéticos constituye, junto con el hidrógeno procedente del agua y elementos minerales absorbidos por raíces, la base estructural del crecimiento de vegetales y, en consecuencia, de producción primaria de ecosistemas y la biosfera” (Azcón & Talón, 2013).

5.4. Captura de carbono

Una opción para la reducción de los efectos de los GEI y la captura de estos, se basa en la captura de carbono en los suelos o en las biomásas terrestres, sobre todo en las tierras usadas para la agricultura o la forestación. De acuerdo al Protocolo de Kyoto esto se conoce como “uso de la tierra, cambio en el uso de la tierra y forestación” y concierne los artículos 1.3 y 1.4 del Protocolo. Por su parte se denomina sumidero carbono a todo sistema o proceso por el que se extrae de la atmósfera un gas o gases y se almacena. Las formaciones vegetales actúan como sumideros de C por su función vital principal, la fotosíntesis, en la que los vegetales absorben CO₂ que compensa tanto las pérdidas de este gas que se producen por la respiración como las emisiones producidas en otros procesos naturales (descomposición de materia orgánica) (FAO, 2002).

Trabajos en municipios de Patacamaya y Sica Sica, sobre cuantificación de carbono almacenado en la biomasa de los th'olares como mitigación al cambio climático, muestran resultados en los que se identifica del potencial de los sistemas de los th'olares pueden remover cantidades significativas de carbono de la atmósfera al incorporarlo a su biomasa. En la recolección de muestras de th'olas en la provincia Aroma se determinó la biomasa aérea y biomasa subterránea en campo, asimismo se ha cuantificado la materia seca en laboratorio, y

mediante el ajuste de IPCC (2003) se ha determinado la cantidad de CO₂ absorbido y carbono C acumulado en th'olares por comunidad, como se muestra en la siguiente Tabla:

Tabla 1

Valores de C y CO₂ capturados en muestras de th'olas provincia Aroma

COMUNIDAD Y/O ESPECIE	CARBONO (C) (t C/ha)	DIOXIDO DE CARBONO CO ₂ (t CO ₂ /ha)
Carachuro	5,17	18,99
Cauchi Titiri Ventilla Var. Ñakat'ola	1,39	5,11
Var. Amamayt'ola	0,41	1,49
Cauchi Titiri Pairumani Var. Ñakat'ola	1,2	4,41
Cauchi Titiri Iru Centro Var. Ñakat'ola	1,75	6,44
Uchusuma Var. Suput'ola	2,11	7,73
Uchusuma Var. Ñakat'ola	0,92	3,37

Fuente: Elaboración propia en base a (Ponce, 2008)

5.4.1. Biomasa vegetal

Biomasa es el resultado de la absorción de la energía solar, la cual, gracias a la fotosíntesis, es aprovechada por las plantas verdes mediante reacciones químicas en las células, las que toman CO₂ del aire y lo transforman en sustancias orgánicas (Secretaría de Energía, 2008). Por otro lado, la Unión Europea indica que la “Biomasa es la fracción biodegradable de productos, desechos y residuos de la agricultura (incluyendo sustancias vegetales y animales), silvicultura e industrias relacionadas, así como la fracción biodegradable de los residuos municipales e industriales” (Cerdá, 2012).

La acumulación de biomasa y la consiguientes generación, acumulación y distribución de la materia seca son propias para cada especie, pero los fenómenos que las gobiernan son genéricos, debiendo entenderse estas relaciones individualmente y para cada órgano de la planta afectadas por el medio ambiente y su interacción (Manrique y Bartholomew, 1991). En general la biomasa corresponde a la cantidad total de materia viva presente en un momento dado para un sistema biológico, expresada en unidades de peso seco por unidad de superficie (Maquera, 2017). Así también aproximadamente del 42 al 50 % de la biomasa de un árbol materia seca es carbono. Hay una captura de carbono neta, únicamente mientras el árbol se

desarrolla para alcanzar madurez. En estado estable, un bosque en plena madurez aporta la misma cantidad de carbono que captura. (Martinez y Leyva, 2014).

El CO₂ secuestrado por las plantas es el resultado de las diferencias entre el CO₂ atmosférico captado durante el proceso fotosintético y el CO₂ emitido por la atmósfera durante la respiración. Esta diferencia se convierte en biomasa y suele estar entre el 45-50% del peso seco de la planta. Lo anterior muestra la importancia de desarrollar prácticas de captura de carbono, para reducir o controlar la emisión de carbono a la atmósfera. A continuación, se mencionan algunos valores para carbono asimilado en planta de avena, en raíz 0.1gC y 0.37 gCO₂, en parte aérea 2.8 gC, y 10.27 gCO₂, teniendo un total de 10.63 gCO₂. Por parte de la planta de cebada tenemos, en raíz 0.2 gC y 0.7 gCO₂, parte aérea 3.0 gC, y 12.3 gCO₂, teniendo un total de 13.0 gCO₂ (Carvajal y otros, 2014).

5.4.2. Carbono y materia orgánica en el suelo

El carbono en el suelo representa la mayor reserva en interacción con la atmósfera alrededor de 1 500 Pg C a 1 m de profundidad (cerca de 2 456 a dos metros de profundidad). Por su parte, el carbono inorgánico representa cerca de 1 700 Pg. pero es capturado en formas más estables tales como el carbonato de calcio. La vegetación (650 Pg) y la atmósfera (750 Pg) almacenan considerablemente menos cantidades que los suelos. En el informe de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), indica que “*emisiones correspondientes al cambio de uso de la tierra -deforestación e incremento del pastoreo y de tierras cultivadas- fueron cerca de 140 Pg entre 1850 y 1990 (de 0,4 Pg/año en 1850 a 1,7 Pg/año en 1990), con liberación neta hacia la atmósfera de 25 Pg de carbono*”. (Houghton, 1995).

Según (Hernandez, 2013), el contenido de carbono orgánico del suelo depende de:

Clima: La materia orgánica disminuye más rápido a más alta temperatura, así, en los climas más calurosos, los suelos suelen tener menos materia orgánica que en los climas más fríos.

Textura del suelo: En general, los suelos de textura fina tienen más materia orgánica que los de textura gruesa y retienen mejor los nutrientes y el agua, por lo que reúnen buenas

condiciones para el crecimiento vegetal. Los suelos de textura gruesa se caracterizan por una mejor aireación y la presencia de oxígeno acelera la descomposición de la materia orgánica.

Hidrología (drenaje): Cuanto más húmedo sea un suelo, menos oxígeno hay para los procesos de descomposición de la materia orgánica, que se acumula.

Para la determinación de la humedad del suelo, la densidad aparente de suelo muestreado permite hallar la relación entre masa de agua contenida en la muestra y la masa seca de este a peso constante. Se trata de la expresión del estado hídrico del suelo.

(Universidad Nacional de Córdoba, s/f).

Flores (2010), señala que la humedad del suelo influye en muchas propiedades físicas, tales como la densidad aparente, espacio poroso, compactación, penetrabilidad, resistencia al corte, consistencia, succión total de agua y color del suelo. La humedad del suelo es muy dinámica y depende del clima, vegetación, profundidad del suelo, y de las características y condiciones físicas del perfil. Se entiende por humedad del suelo a la masa de agua contenida por unidad de masa de sólidos del suelo.

Manejo de las tierras (laboreo): El laboreo aumenta el volumen de oxígeno en el suelo e incrementa la temperatura media de éste, lo que estimula la descomposición de la materia orgánica. También se produce pérdida de materia orgánica debido a la erosión, que reduce la capa superficial arable y el humus. En general, los cultivos aportan menos materia orgánica al suelo que la vegetación nativa.

Vegetación: Las raíces aportan mucha materia orgánica al suelo. Las plantas de prados y pastizales tienen raíces profundas que se descomponen dentro del suelo.

En los suelos forestales, en cambio, es la descomposición de las hojas la que aporta al suelo la mayor parte de la materia orgánica. Los cultivos producen más biomasa aérea que las raíces. La producción de materia orgánica en las tierras de labor depende del tipo de manejo de las tierras y, en particular, de si se retiran o dejan los rastrojos.

Biomasa microbiana

Díaz (2001), establece que la biomasa microbiana del suelo es un indicador temprano de las variaciones dentro de la fracción orgánica provocadas por el manejo de los suelos. Por consiguiente, la biomasa microbiana define el componente funcional de la microbiota del suelo, responsable principalmente de la descomposición y reconversión de la materia orgánica y la transformación de nutrientes. La biomasa microbiana edáfica puede definirse como la parte viva de la materia orgánica del suelo, excluyendo las raíces de las plantas y los animales de tamaño superior al de las amebas mayores (Acosta y Paoloni, 2006).

Moreno (2007), afirma que la determinación del carbono microbiano es considerada por varios autores como la técnica más fiable en lo que respecta a la cuantificación de la biomasa microbiana, especialmente cuando se trata de valorar el resultado generado por la aplicación de sustratos orgánicos. Entre los métodos indirectos empleados en la determinación de la biomasa microbiana son respiración inducida por sustrato, la técnica de fumigación – extracción o la de fumigación incubación, la cuantificación del ATP (Adenosín Trifosfato).

5.5. Actividad fotosintética medida por la fluorescencia

La fluorescencia es un tipo de luminiscencia que se da en sustancias gaseosas, líquidas o sólidas que son capaces de absorber radiaciones electromagnéticas (por ejemplo, luz), y emitir parte de esa energía como radiación de una longitud de onda diferente a la absorbida. Dentro de este marco “En general, la longitud de onda emitida por una sustancia fluorescente es mayor que la recibida (es decir que su energía es menor). La duración de todo el proceso es de unos nanosegundos, por lo que se considera que es instantáneo” (Analítica, 2002).

Al iniciarse la fotosíntesis, el efecto de la luz activa los pigmentos fotosintéticos de la membrana celular, inicia con la energía absorbida, misma que es transferida como energía de excitación y atrapada por el centro de reacción, para después ser utilizada para hacer trabajo químicamente útil; al mismo tiempo, otra parte es disipada principalmente como calor y en menor grado re-emitida como energía luminosa de menor energía (fluorescencia) (Moreno, Perales y Salcedo, 2008).

La fluorescencia de la clorofila permite aproximarse al desempeño fotosintético y al estado del aparato fotosintético a nivel del fotosistema II y proviene del hecho de que la luz que absorbe la clorofila de la hoja puede tomar tres vías distintas; ser direccionada al fotosistema II para realizar fotosíntesis, ser liberada en forma de calor o ser reemitida en una longitud de onda mayor como fluorescencia (Maxwell y Johnson, 2000). Aunque las mediciones de fluorescencia a veces pueden proporcionar una medida útil del rendimiento fotosintético de las plantas, su verdadera fuerza radica en su capacidad para brindar información que no está disponible de otras maneras. En particular, la fluorescencia puede brindar información sobre la capacidad de una planta para tolerar el estrés ambiental y hasta qué punto ese estrés ha dañado el aparato fotosintético (Maxwell y Johnson, 2000).

Por lo anterior, a través de la medición del rendimiento de la fluorescencia en particular, se puede brindar información sobre la capacidad de una planta para tolerar el estrés ambiental y hasta qué punto ese estrés ha dañado el aparato fotosintético (Maxwell & Johnson, 2000). A través de la clorofila se puede obtener información de la eficiencia fotoquímica y la disipación térmica de la energía absorbida. Al respecto, la medición de la fluorescencia es considerado un método eficiente para identificar la influencia de factores externos en los organismos fotosintéticos (Delgadillo et., 2016).

5.6. Factores que influyen en la fotosíntesis

El complejo proceso de fotosíntesis, con sus numerosos pasos que ocurren en varias etapas y tienen lugar en distintos compartimentos estructurales, se ve afectado por diversos factores, tanto ambientales como endógenos o propios de la planta. Entre los factores ambientales principales se cuentan la luz, que proporciona la energía necesaria; la concentración atmosférica de CO₂, que es la fuente de carbono; la temperatura, debido a su influencia en todos los procesos enzimáticos y metabólicos; también juegan un papel la disponibilidad de agua, que puede afectar al grado de apertura estomática y por tanto a la difusión del CO₂, y la disponibilidad de nutrientes (Alegria et al., 2016).

6. MARCO METODOLÓGICO

6.1. Diseño de investigación

Esta investigación no requiere la manipulación intencionada de las variables en estudio, y corresponde a una investigación no experimental, los datos se obtuvieron in situ para su posterior análisis en laboratorio y análisis estadístico. La recolección de información se realizó bajo un diseño de investigación longitudinal, la metodología que se siguió fue recolectar la información en diferentes puntos, durante la época de transición a época húmeda, con la finalidad de realizar inferencias acerca del cambio, sus causas y posibles efectos sobre la absorción de CO₂ en tres localidades y cuatro ecosistemas definidos para el presente estudio.

6.1.1. Enfoque de la investigación

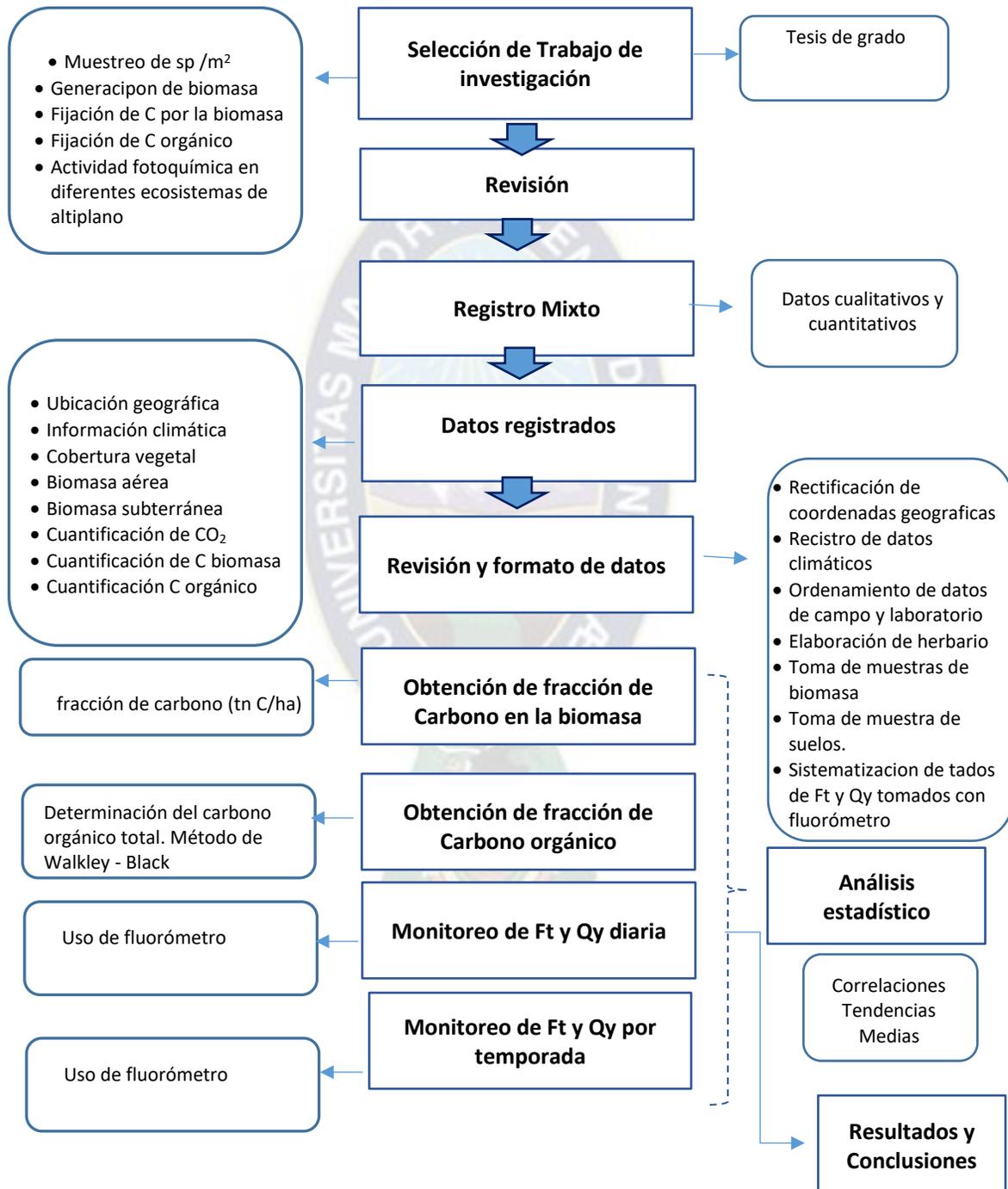
Los datos obtenidos fueron tratados estadísticamente, en particular datos sobre la cantidad de carbono capturado por el sustrato, el estado de cada especie en cuanto a la transformación de carbono en la materia vegetal por fotosíntesis. Las técnicas y métodos de la obtención de esos datos se ajustan a los objetivos perseguidos. Por lo anterior el presente estudio se enmarca en el método inductivo – deductivo.

6.1.2. Tipo de investigación

El estudio es exploratorio, a pesar de existir investigaciones previas, es necesario realizarla de manera paralela en dos zonas, destacando las diferencias en cuatro ecosistemas. Las variables de captura de carbono expresadas en toneladas. El análisis de la tasa de conversión de CO₂ en biomasa (aérea y radical). Otra variable a ser evaluada es la eficiencia del aparato fotosintético mediante el uso de fluorómetro. Finalmente, durante la recolección de información en sitio, se determinó el tipo de vegetación presente. En cada uno de los casos se establecen, identifican y describen los fenómenos y procesos observados.

Figura 1

Flujograma de la metodología empleada para cuantificar la captura de carbono en vegetación nativa en zonas andinas de Bolivia (Ft: fluorescencia instantánea de la clorofila, Qy: rendimiento cuántico del fotosistema II)

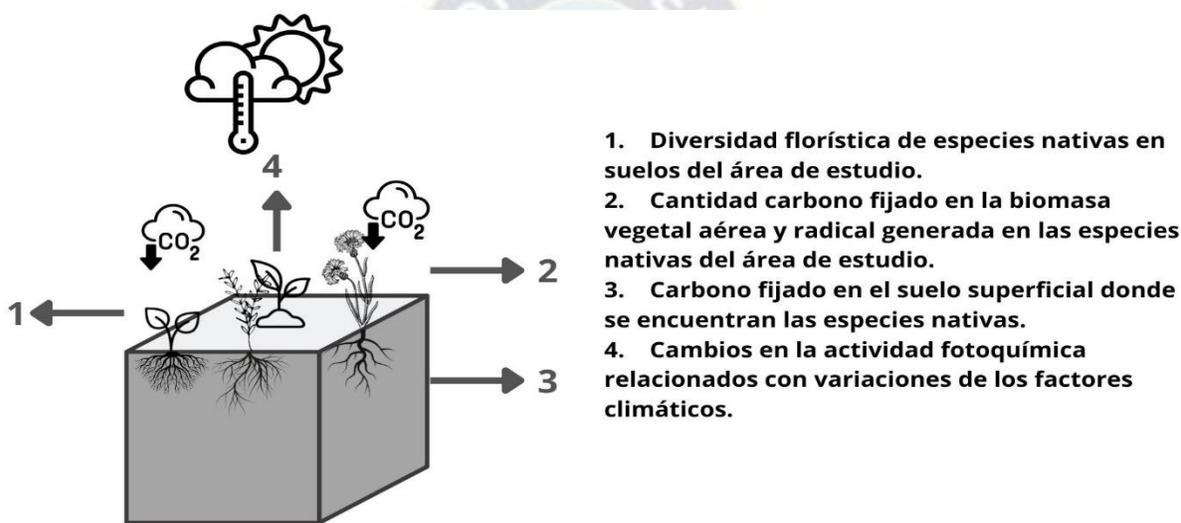


6.2. Muestreo, monitoreo y métodos

Respecto a los métodos correspondientes a los objetivos específicos desarrollados en los puntos 6.2.2, 6.2.3, 6.2.4 y 6.2.6. A continuación se muestra un diagrama (Figura 2) de los procesos en los que se enfoca este proyecto:

Figura 2

Esquema de los métodos utilizados en el desarrollo del proyecto de investigación, que busca la cuantificación de captura de carbono y evaluación de la actividad fotosintética en suelos con cobertura nativa en zonas altoandinas de Bolivia



6.2.1. Diversidad florística

Para describir la diversidad florística de especies nativas, se utilizó el método del cuadrante. El método de cuadrantes permite obtener muestras de vegetación herbácea para evaluaciones florísticas, además, este es el método adecuado para abarcar muchos individuos de la comunidad y su distribución espacial (Meneses et al., 2014, quien citó a Stohlgreen, 2007). la división del cuadrante en 100 sub-cuadrantes - cada uno de 100 cm² - permite estimar visualmente con mejor precisión dos índices de base: número de especies (riqueza específica) y porcentaje de cobertura vegetal de cada especie observada (Kent y Coker 1992). Con este método se puede determinar de forma rápida la diversidad y estructura de las comunidades de plantas. Así pues, desde una apreciación propia, es sugerible evaluar las

plantas en época húmeda donde la mayoría de las especies está en floración y su identificación es precisa, especialmente en el caso de la familia Poaceae y algunos miembros de tamaño reducido de la familia Cyperaceae, como *Phylloscirpus*. En este caso realizamos el análisis descriptivo de las especies encontradas en agosto, porque es considerada como estación de transición. Con el uso de cuadrantes, se estimó el porcentaje de cobertura de cada especie y se realizó la descripción de las especies presentes. La toma de muestras se realizó bajo criterio de accesibilidad, extensión, disponibilidad de datos meteorológicos; y debido a que las áreas de investigación son lejanas entre sí, la investigación tomó como referencia cuatro ecosistemas con praderas nativas en tres localidades representativas de la región altoandina.

Para la determinación de la diversidad florística en los ecosistemas se siguieron los siguientes pasos:

- a. Identificación del área más representativa de la parcela.
- b. Estimación de vegetación, empleando el método del cuadrante con un marco cuadrado de 1m x 1 m (dividido en cuadrados pequeños de 10cm x 10cm en total 100 cuadrados internos realizados con hilo de pescar), se eligió el área más representativa que incluya a todas o la mayoría de las especies del área (Figura 3). La contabilización del número de cuadrados pequeños que ocupan es el indicador del porcentaje de cada especie.
- c. Reconocimiento de cada una de las especies, extrayendo la planta con el mayor cuidado.
- d. Descripción de especies existentes o extraídas. Para la descripción de las especies se recurrió a la colaboración del Herbario Nacional de Bolivia.
- e. La frecuencia de la aplicación del método se realizó una vez antes del muestreo de biomasa y suelo, en los 4 ecosistemas.

Figura 3

Ilustración del método del cuadrante utilizado para la evaluación de la composición florística en el ecosistema pastizal

**6.2.2. Carbono fijado en la biomasa vegetal aérea y radical**

El análisis del carbono capturado por la vegetación se realiza inicialmente a través de la biomasa producida, para luego medir el carbono capturado por la misma.

a. Extracción de biomasa

Se realizó la extracción de la materia vegetal tanto biomasa aérea y biomasa subterránea, en un marco de 50 cm x 50 cm del área de estudio para posteriormente pesarla y secarla. Se realizó con tres muestras por unidad de observación y ecosistemas Pajonal y Bofedal en localidad de Chojñapata; ecosistema Th'olar en localidad de Calahuancani y ecosistema Pastizal en localidad de Cota Cota, esto después de conocer la composición florística de cada ecosistema, realizado en el mes de septiembre (Figura 4).

b. Relación de peso de materia seca y húmeda.

Posterior al muestreo, cada muestra de biomasa se pesó (Figura 5), luego se realizó el secado en un horno de aire forzado a 60 ° C hasta un peso constante, lo que determinó la relación entre materia seca y húmeda y la cantidad de carbono.

Figura 4

Extracción de un Individuo de la especie Baccharis tola Phil.



c. Cálculo de carbono capturado en la biomasa vegetal del área de estudio

Se determinó el carbono fijado en la biomasa en 4 ecosistemas: Bofedal, Pajonal, Th'olar y Pastizal, el muestreo para este objetivo se llevó a cabo en octubre. Con los valores obtenidos en el anterior paso se calculó el total de toneladas de materia seca por hectárea (t ms/ha) y posteriormente cantidad de carbono en toneladas por hectárea (t C/ha), finalmente toneladas de dióxido de carbono por hectárea (t CO₂/ha), para lo cual se utiliza t C/ha las fórmulas señaladas a continuación:

$$MS_{muestra} = \left(\frac{MS_{submuestra}}{MF_{submuestra}} \right) * MF_{muestra} \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta C_{BN\ muestra} = MS_{muestra} * CF \dots\dots\dots (2)$$

$$CO_2 = Kr * \Delta C_{BN\ muestra} \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

$MS_{muestra}$ = Masa seca de la muestra total (50x50 cm de área)

$MF_{muestra}$ = Masa fresca de la muestra total (50x50 cm de área)

$MS_{submuestra}$ = Masa seca de la submuestra

$MF_{submuestra}$ = Masa fresca de la submuestra

$\Delta C_{BN\ muestra}$ = Cantidad de carbono en la muestra total

CO_2 = Cantidad de dióxido de carbono en la muestra total

$Kr = 3,67$. Factor de conversión a CO_2 , resultante del cociente de los pesos moleculares del dióxido de carbono 44 y del carbono 12

CF = es la fracción de carbono (Kg C/Kg ms) determinada en el laboratorio o utilizando el valor patrón del IPCC = 0,5 (Quito, 2018).

Figura 5

Pesaje de la masa seca de la muestra para la determinación del carbono capturado en la biomasa vegetal



6.2.3. Carbono fijado en el suelo superficial

a. Colecta de muestras para medición de carbono orgánico

Se recolectaron tres muestras de suelo para cada profundidad, utilizando un cilindro con volumen conocido, en el caso de la localidad de Calahuancani, se recolectaron muestras de suelo sin el cilindro metálico, en este caso se utilizaron otros métodos para determinar la densidad aparente (Miranda y Caballero, 2015), debido a que contábamos con un suelo

gravoso lo cual podría perjudicar en la precisión e incluso arruinar el mismo cilindro. La colecta se realizó en el mes de octubre conjuntamente con el muestreo de biomasa.

b. Profundidad de muestreo

Las concentraciones de carbono orgánico son más altas en la capa superior y disminuye exponencialmente en la profundidad, tomando la muestra a profundidades de por lo menos 30 cm, está dividida en tres horizontes (0-10, 10-20, 20-30), ver Figura 6. En el caso del bofedal se consideraron profundidades de hasta 50 cm. Todas estas muestras con su debida identificación y traslado a laboratorio.

Figura 6

Muestreo en el ecosistema th'olar para unos horizontes de hasta 30 cm de profundidad en el suelo



c. Determinación del carbono orgánico total. Método de Walkley - Black

La reacción se basa en la oxidación incompleta del carbono orgánico por una mezcla oxidante de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) acentuada por el calor de dilución acuosa del H_2SO_4 ($110^\circ C - 130^\circ C$) dependiendo de la temperatura inicial de los reactivos, contenido de materia orgánica y tamaño del recipiente de reacción. La cantidad de agente oxidante consumido en esta, se determina mediante titulación con sulfato ferroso amoniacal, Figura 7 (Miranda y Caballero, 2015).

El contenido de carbono en el suelo se calculó con base en la siguiente ecuación propuesta por González et al. (2008), como lo menciona Pari, (2018), para diferentes

profundidades hasta 30 cm. Las unidades se sometieron a diferentes factores de conversión para obtener un resultado final en t C/ha.

$$\text{COS} = \text{Co} * \text{Dap} * \text{Ps} \dots \dots \dots (4)$$

Donde:

COS = Contenido de carbono orgánico del suelo (kg/m^2)

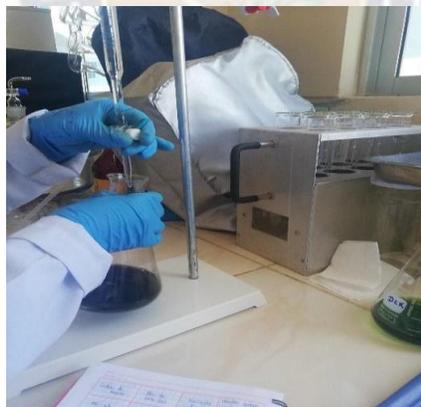
Co = Concentración de carbono en el suelo (%)

Dap = Densidad aparente (kg/m^3)

Ps = Profundidad del suelo (m)

Figura 7

Titulación con sulfato ferroso amoniacal empleado en el método de Walkley – Black para la determinación del carbono orgánico



d. Determinación del carbono de la biomasa microbiana por el método de fumigación-extracción.

A través de la exposición de la microflora del suelo a una atmósfera de cloroformo por espacio de 24 horas (Figura 8), los microorganismos del suelo son lisados, pero los componentes inanimados de la materia orgánica no se afectan. El C y N orgánico extraído en una solución de sulfato de potasio (0,5 M) es determinado en muestras de suelo fumigadas y no fumigadas según la metodología seguida en (Caballero, 2012), el incremento en las

cantidades de C y N determinado en las muestras fumigadas con respecto a los controles es considerado como carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana del suelo. El método es usualmente nombrado como “fumigación extracción” (Brookes, Landman, Pruden, y DS, 1985).

Figura 8

Fumigación con cloroformo de las muestras a analizar para la determinación del carbono de la biomasa microbiana



6.2.4. Monitoreo de la actividad fotoquímica de las especies vegetales

El estudio se llevó a cabo en dos fases paralelamente ejecutadas:

FASE 1: La primera fase busca conocer si existe diferencia en el nivel de desempeño fotosintético durante diferentes horas del día en condiciones climáticas de pastizal. Se efectuó únicamente en la localidad 3, corresponde una investigación más ampliada.

FASE 2: La segunda fase busca conocer que factores climáticos afectan en la fluorescencia instantánea de la clorofila Ft y su correspondiente rendimiento del fotosistema II Qy en los diferentes ecosistemas seleccionados para esta investigación. Comprende la validación y comparación de los métodos empleados en la primera fase, en la localidad 1 y 2.

Ambas fases comprenden:

- Relevamiento de especies en mayor cantidad.
- Toma de muestras para cuantificación de carbono absorbido
- Muestreo de suelos
- Muestreo material vegetal

- Trabajo de laboratorio

6.2.5. Cambios en la actividad fotoquímica relacionados con variaciones de los factores climáticos.

Para la medición de los parámetros de fluorescencia (Ft: fluorescencia instantánea de la clorofila, Qy: rendimiento cuántico del fotosistema II) con el equipo fluorpenFP110, se preparó primero la muestra adaptada a la oscuridad, colocando la muestra durante al menos 10-15 minutos en ausencia de luz. La adaptación a la oscuridad se puede lograr fácilmente colocando los clips de la hoja separados en posición cerrada en la hoja antes de las mediciones. Solo el FP110 / D o PAR-FP110 / D está diseñado para usarse con los clips de hoja desmontables. (Photon Systems Instruments, 2021) (Figura 9).

Figura 9

Monitoreo de los parámetros de fluorescencia con el equipo FluorPen FP 10



- Variación de las mediciones de los parámetros de fluorescencia (Ft y Qy) a lo largo del día.

Para verificar si existen diferencias entre mediciones realizadas en diferentes momentos del día, se evaluaron 4 ejemplares por planta, en 4 horarios (10:00 am, 12:00 pm, 14:00 pm y 16:00 pm), por cuatro días no consecutivos. Asimismo, la unidad experimental correspondió a la hoja. Se realizó el registro de Ft y Qy en la estación de Cota Cota como zona

representativa de las praderas nativas del altiplano, para obtener una estimación de mayor confiabilidad. Este seguimiento se realizó sólo en la primera fase, correspondientes a los primeros días para las mediciones con el fluorómetro.

b. Variación de las mediciones de los parámetros de fluorescencia (F_t y Q_y) a lo largo de la temporada

Para determinar la variación de los parámetros de fluorescencia durante la época seca se monitorearon las plantas nativas de los cuatro ecosistemas de estudio (Pajonal en Chojñapata, Bofedal en Chojñapata), Th'olar en Calahuancani y Pastizal Cota Cota); se realizó el monitoreo a 4 ejemplares por planta para cada parcela. La unidad experimental correspondió a la hoja, se evaluó semanalmente, durante la época seca y de transición a época húmeda en los meses de agosto a diciembre, se obtuvieron 14 mediciones durante este periodo en los ecosistemas Bofedal, Pajonal y Th'olar y 20 mediciones semanales en el ecosistema pastizal.

Debido a las distancias entre las localidades de estudio, el registro de datos no se pudo realizar simultáneamente. No obstante, se intentó registrar datos en el rango horario de 10:00 a 14:00, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el estudio de la variación a lo largo del día. Además, se eligió este período debido a la presencia de luz solar, fundamental para la actividad fotosintética.

El método empleado fue el monitoreo de especies más representativas en cada ecosistema, para la aplicabilidad de este método se debe describir el escenario ambiental (datos climáticos: temperatura media, precipitación, humedad y radiación solar) a la cual está sometida la planta. Así pues, los datos de condiciones ambientales se obtuvieron de estaciones meteorológicas dependientes de institutos universitarios (Proyecto Manejo Antropogénico de Suelos – UMSA) y también se complementó la información de ecosistema pastizal con datos climáticos obtenidos de la estación meteorológica del SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) en Palca; es importante aclarar que la mayoría de nuestras estaciones meteorológicas a nivel nacional no cuentan con un sistema de medición de CO_2 atmosférico, por lo cual no se consideró en este trabajo; sin embargo la importancia de este

parámetro se debe a que se constituye en el carbono disponible para la fotosíntesis de la planta.

Cabe mencionar que se utilizaron los datos climáticos correspondientes al día de medición; sin embargo, estas variables climáticas pueden impactar no de manera inmediata sino de manera previa. Considerando la capacidad de campo, la precipitación aporta el agua retenida por el suelo después de 48 horas de drenaje, la cual puede ser utilizada por las plantas (Shaxson y Barber, 2005). Después del ejemplo mencionado y sabiendo que las variables climáticas tienen relación entre sí se consideró realizar la correlación con las variables climáticas de un día previo y hasta dos días previos al día de la medición.

6.2.6. Georreferenciación

El estudio se realizó en tres localidades dentro del departamento de La Paz, con cuatro parcelas en evaluación, correspondientes cada una a un ecosistema diferente, a continuación, se detallan sus características en la Tabla 2.

Tabla 2

Georreferenciación de los diferentes ecosistemas

N°	Provincia	Municipio	Localidad	Ecosistema	Altitud (msnm)	Coordenadas Geográficas	
						X (longitud)	Y (latitud)
1	Omasuyos	Ancoraimes	Chojñapata	Bofedal	4251	- 68,877093	- 15,786868
2	Omasuyos	Ancoraimes	Chojñapata	Pajonal	4251	- 68,872265	- 15,789145
3	Omasuyos	Ancoraimes	Calahuancani	Th'olar	4093	- 68,841490	- 15,851816
4	Murillo	La paz	Cota Cota	Pastizal	3448	- 68,061035	- 16,538143

Fuente: Elaboración propia

6.2.7. Época de muestreo

Se llevó a cabo un registro de datos en dos etapas. La primera fase abarcó el periodo de transición, desde julio hasta diciembre, mientras que la segunda fase se extendió de agosto a diciembre.

6.2.8. Materiales

- Barreno
- Picota
- Pala
- Flexómetro
- Bolsas plásticas
- Cámara fotográfica
- Tijera de podar
- Libreta de campo
- Cilindros metálicos de volumen conocido
- Marcadores

6.2.9. Equipos

- Balanza digital
- Matraces
- Pipetas
- Buretas
- Estufa
- Fluorómetro (fluorpen 110)
- Morteros
- Tamices
- Desecadores de cristal de vacío
- Bomba de vacío
- Gránulos para favorecer la ebullición
- FluorPen FP 110

FluorPen es un fluorómetro de clorofila y se utiliza para medir diferentes parámetros fotosintéticos en plantas. El FluorPen FP 110 utiliza el principio de medición basado en la fluorimetría modulada por pulsos (PAM); además, cabe mencionar que este instrumento se encuentra equipado con un emisor LED azul (470 nm), filtrado ópticamente y enfocado con precisión para brindar intensidades de luz de hasta $3.000 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ al tejido vegetal medido,

permitiendo al investigador medir la fluorescencia de la clorofila. Asimismo, el fluorómetro es un equipo portátil que funciona con baterías que permite una medición rápida y precisa de la clorofila, parámetros de fluorescencia (Ft: Fluorescencia instantánea de clorofila, QY: Rendimiento cuántico del fotosistema II) en plantas. Se trata de un dispositivo para estudiar la actividad fotosintética, detección de estrés, pruebas de herbicidas, o cribado de mutantes / variedades / transgénicos en el campo (Photon Systems Instruments, 2021). Se utilizan principalmente para el estudio de la actividad fotosintética y otros estudios relacionados con el estado de salud de las especies. Asimismo, La fluorescencia nos ayudara a conocer la reacción de las plantas a el estrés ambiental propio de las condiciones de las zonas altoandinas.

6.2.10. Reactivos

Los siguientes reactivos se utilizaron para analizar el carbono orgánico del suelo en laboratorio.

- Ácido sulfurico H_2SO_4 concentrado
- Ácido fosforico H_3PO_4 concentrado
- Dicromato de potasio $K_2Cr_2O_7$ 1N
- Sulfato Ferroso Diamonico hexahidratado 0,5 N
- Difeniamina 2% (indicador)
- Cloroformo libre de etanol
- Hidroxido de Sodio NaOH 1M
- Agua destilada

6.2.11. Análisis estadístico

Para el análisis correspondiente se realizó mediante el paquete estadístico SPSS (Statistical Package for the Social Sciences)

6.2.11.1. Unidad experimental

Se trata de los eventos de los cuales se toma los datos, en este caso, las unidades experimentales se constituyen los registros de Ft y Qy. Y la unidad de estudio son las partes de la planta, las hojas, de las cuales se hizo el registro de datos de Ft y Qy.

6.2.11.2. Prueba de normalidad

- a) La prueba de Shapiro-Wilk por tener un número de registros menor a 50 con nivel de significancia =0,05%, bajo los siguientes criterios estadísticos:

P-Valor >0,05: Aceptamos Ho (La variable aleatoria si tiene distribución normal)

P-Valor < 0,05: Aceptamos H1 (La variable aleatoria no tiene distribución normal)

- b) La prueba de Kolmogorov-Smirnov (> 50 datos) con nivel de significancia =0,05, bajo los siguientes criterios estadísticos:

P-Valor >0,05: Aceptamos Ho (La variable aleatoria si tiene distribución normal)

P-Valor < 0,05: Aceptamos H1 (La variable aleatoria no tiene distribución normal)

6.2.11.3. Prueba anova – análisis de medias

La prueba de anova con nivel de significancia =0,05, bajo los siguientes criterios estadísticos:

Sig. >0,05: Aceptamos Ho (Las medias de los grupos son iguales)

Sig. < 0,05: Aceptamos H1 (Las medias de los grupos no son iguales)

La prueba de normalidad aplicada para las variables aleatorias estudiadas.

6.2.11.4. Prueba de correlación - Rho de Spearman

La prueba de Rho de Spearman es una prueba no paramétrica que mide el grado de asociación entre dos variables (Parra, 2023). Por la no normalidad de Ft y Qy se utilizó este método.

Donde se evalúa el nivel de correlación, es decir la fuerza y dirección de la asociación entre dos variables de rango. La dirección puede ser positiva es decir relación directa o viceversa.

Los valores van desde 0 (correlación nula), a 1 (correlación directa) y -1 (correlación indirecta). Según el valor del coeficiente de correlación, la relación puede ser débil (0,01 a 0,10), media (0,11 a 0,50), considerable (0,51 a 0,75), muy fuerte (0,76 a 0,90) y perfecta (0,91 a 1)

7. RESULTADOS Y DISCUSIONES

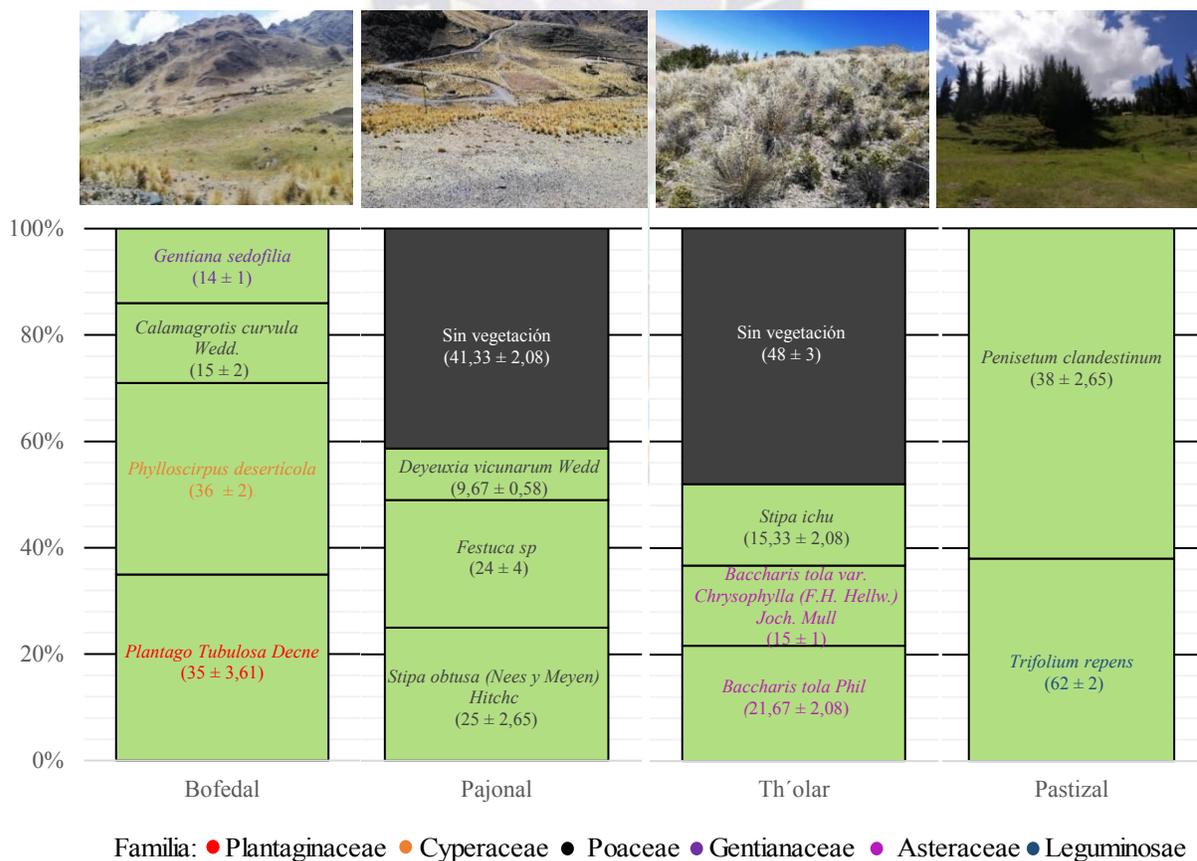
Los resultados que se presentan a continuación se dividen en la diversidad florística, biomasa vegetal y carbono orgánico del suelo (incluyendo la biomasa microbiana) como indicadores de contenido y almacenamiento de carbono en la vegetación y suelo. Finalmente, tenemos resultados de la actividad fotosintética de los cuatro ecosistemas evaluados considerando la variabilidad diurna y por temporada.

7.1. Diversidad florística

Bajo la metodología del cuadrante en biodiversidad vegetal, se estimó el porcentaje de cobertura de cada especie, así como también la familia a la cual pertenecen (Figura 10).

Figura 10

Porcentajes de cobertura de las especies vegetales presentes, correspondientes a los cuatro ecosistemas en las diferentes localidades altoandinas



De acuerdo con la recolección de datos en el ecosistema bofedal se pudo observar que existe mayor presencia de las especies *Plantago tubulosa* Decne con 35% y el *Phylloscirpus deserticola* con un 36%; también se puede notar que las especies con menor presencia son: *Calamagrotis curvula* Wedd con un 15 % y *Gentiana sedofilia* con un 14%. En línea con lo anterior, Genin y Alzérreca (1995) señalan que las especies representativas en bofedales son plantas pluviales de los géneros *Distichlis* y *Plantago*; también mencionan que se asocian a especies de los géneros *Carex*, *Calamagrostis*, *Gentiana*, *Werneria* e *Hypsella* así como la rosácea del género *Lachemilla*. No obstante, Alzérreca (2001) indica que la composición botánica varía de un bofedal a otro en función a la cantidad presente de agua, época, contenido de sales tanto en el suelo como en del agua, altitud, pastoreo y manejo del bofedal. Dicho en otras palabras, es muy poco probable que otros bofedales contengan las mismas especies.

En el ecosistema pajonal de la localidad de Chojñapata, se puede apreciar la ausencia de vegetación, que alcanza mayor porcentaje de área con 41,33%. Además, se observa la presencia de *Festuca sp* con 24% y *Stipa obtusa* (Nees y Meyen) Hitchc con 25% que son mayores frente a *Deyeuxia vicunarum* Wedd con 9,67%. Sin embargo, Wilcox y Bryant (1980), citados por Reyes (2011), sugieren que la *Festuca dolichophylla* está prácticamente extinta, debido al sobrepastoreo en praderas de Festucas, Deyeuxias, Muhlebergia y Poas. La reducción de especies deseables y productivas está siendo reemplazada por *Deyeuxia vicunarun* y *Lachemilla*. En este caso, la forma de cojin de *Deyeuxia vicunarum* Wedd se caracteriza por una escasa colonización, sirve como alimento para ovejas, y también protege los suelos de la erosión hídrica y eólica. En esa misma línea, mencionar que la época de crecimiento de los pastos naturales coincide con la estación de lluvias, seguido por la estación seca, en la que las hierbas más delicadas desaparecen quedando una vegetación compuesta principalmente por poaceas (Tapia & Flores, 1984, citado por Zapana, 2019).

Los th'olares pueden ser puros o asociados, los puros llamados así porque se observa mucha más th'ola que otros pastos (PNUD, 2002). Asimismo, el th'olar estudiado en esta ocasión tiene predominancia de especies de th'olas como ser *Baccharis tola* Phil con 21,67% y *Baccharis tola var. Chrysophylla* (F.H. Hellw.) Joch. Mull un 15% de cobertura. La ausencia de vegetación en esta zona de estudio alcanza el porcentaje más alto del 48%. Reyes (2011) indica que en el tipo de pradera pajonal th'olar, las especies de mayor dominancia son:

Stipa ichu, *Deyeuxia curvula*, *Festuca dolichophylla*, *Scirpus rigidus*, *Aciachne pulvinata*, *Deyeuxia sp*, *Deyeuxia vicunarum*, *Festuca orthophylla*, *Deyeuxia rigescens*, *Aciachne pulvinata*, *Junellia minima*, *Ganaphalium badium*, *Hypochoeris sp*, *Astragalus sp*, *Trifolium amabile*. Sobre la base de lo mencionado, la única especie que coincide en el th'olar estudiado es *Stipa ichu*, la cual se encuentra en la familia poaceae, con una representación del 15,33% en el ecosistema.

Finalmente, en el pastizal las especie que predominan son *Penisetum clandestinum* con 62% y con 38% el *Trifolium repens*. Por tanto, los pastizales son ecosistemas naturales o de origen antrópico dominados por hierbas que sirven de pasto, es decir que son alimento para los herbívoros, mismas características que tiene el *Penisetum clandestinum* y *Trifolium repens* que son muy ricas en proteínas. Ahora bien, generalmente se hace referencia a pastizal como tierra dedicada al pastoreo, con vegetación natural, estas áreas cubiertas por una vegetación herbácea, donde predominan poaceas, ciperáceas y rosáceas, varían en su composición de acuerdo a la humedad, exposición solar y características edafológicas como textura y contenido de materia orgánica (Zapana, 2019). El *Penisetum clandestinum* pertenece a la familia de poaceae, que en este caso predomina en el pastizal de estudio.

En general los datos registrados fueron tomados en época seca de transición a húmeda donde existe la predominancia de gramíneas o poaceas, en cada ecosistema se observo la presencia de al menos una especie de la familia poaceae. Igualmente es importante resaltar que, según la descripción de cada especie considerada en los Anexos F, G, H e I, sobresale la característica de todas las especies estudiadas que son perennes según la duración de su ciclo vegetativo. Gutiérrez et al (2013) afirmaron que no se debe descartar la presencia de otras especies que no estuvieron presentes durante el período de muestreo especificado. Según la explicación anterior, es posible que se observen otras especies en algunos ecosistemas en otras épocas.

Entre las características también destaca el tamaño de las hojas de las especies, que resultan ser pequeñas, lo cual es típico de varias especies altoandinas. Al mismo tiempo existen diferencias notorias entre los grupos de especies vegetales en los ecosistemas, en bofedal y pastizal se observan plantas de reducido tamaño y de verdor intenso, a diferencia de

los ecosistemas th'olar y pajonal donde las plantas alcanzan tamaños mayores, especialmente en las partes aéreas y tienen un color amarillento verdoso.

7.2. Carbono fijado en la biomasa vegetal

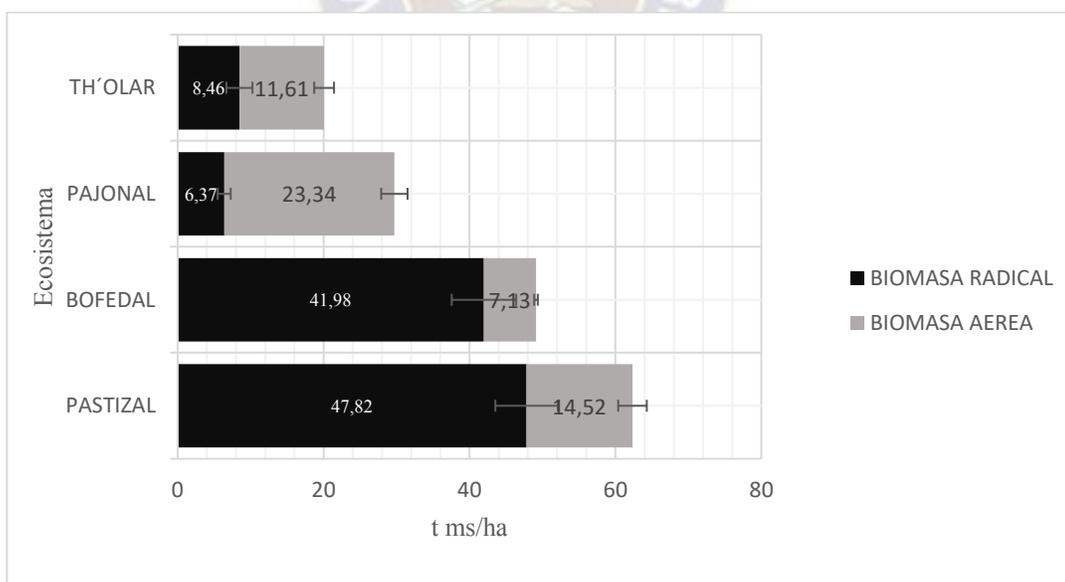
En este punto se muestran los resultados de biomasa total producida como resultado de la transformación de carbono a material orgánico. Posteriormente, la cantidad de carbono capturado en esta biomasa vegetal en cada ecosistema.

7.2.1. Biomasa radical y aérea

La biomasa se refiere al producto de la transformación de CO₂ en materia vegetal. La biomasa se expresa en unidades de peso seco por unidad de área (Maquera, 2017). Así en cada ecosistema el comportamiento es diferente (sig. <0,05), según el análisis estadístico ANOVA de medias de Tukey (sig.: 0,02), para los datos presentados en la Figura 11.

Figura 11

Relación de biomasa radical y aérea (biomasa total) generada por ecosistema



Sobre la base de los datos recolectados se encontró que en pastizal se desarrolla la mayor cantidad de biomasa total 62,35 t ms/ha, seguida por bofedal 49,12 t ms/ha, los datos para pajonal 29,80 t ms/ha y th'olar 20,10 t ms/ha son los de menor registro. Se observó que

las especies del pajonal desarrollan mayor cantidad de biomasa aérea de 23,34 t ms/ha, donde las especies llegan a medir hasta un metro en la parte aérea. Sin embargo, el bofedal y pastizal desarrollaron una mayor cantidad de biomasa en raíces con 41,98 t ms/ha y 47,82 t ms/ha, respectivamente. La biomasa aérea es baja, pero la biomasa de raíces es abundante y puede extenderse hasta 50 cm o más por debajo de la superficie, en el caso del bofedal.

Los resultados muestran la influencia de las condiciones del hábitat (altiplano) en el que se desarrollan las especies, que según Pari (2021) consiste en un clima muy frío, seco, con grandes amplitudes térmicas diarias y cuya humedad que puede verse influenciada por la ubicación. Así, los ecosistemas donde las condiciones de humedad son más favorables a nivel de raíces, estas tienden a desarrollarse significativamente en relación con las partes aéreas. Además, es común que, bajo condiciones ambientales adversas como el déficit de agua característico de las zonas áridas o deficiencia de nutrientes en la zona de la raíz, la relación entre la biomasa de la raíz y la biomasa del tallo tienda a aumentar (Wan et al., 1993). Por su parte, la biomasa de raíces en pastizales áridos ha sido escasamente investigada y a menudo se subestima a la hora de determinar las reservas de carbono en diferentes ecosistemas (Evans et al., 2013), aunque las raíces pueden ser la principal fuente de biomasa en algunas especies, como en los ecosistemas bofedal y pastizal.

López (2015) en su estudio sobre captura de carbono en el pasto, para el pasto King grass variedad morado, el mayor dato de cuantificación de materia verde 121,10 t/ha; esta cantidad representa poco menos del doble de la obtenida en las especies estudiadas en el pastizal que fue de 62,35 t/ha. Ahora bien, Flores (2008) en su estudio sobre captura de carbono en la chillillua (paja), menciona que el promedio de biomasa seca fue de 5,51 t/ha, a diferencia de los datos obtenidos en el presente estudio para pajonal que fueron de 23,34 t/ha en la parte aérea. Estas diferencias pueden atribuirse al tamaño de especies, así como también a la localización de los ecosistemas estudiados.

Quito (2018) realiza la cuantificación de la biomasa generada en la planta del maíz considerando la parte herbácea y la del maíz, haciendo mención que para la parte herbácea el valor más alto y más bajo fue 9,5 t/ha y 3 t/ha, respectivamente; en lo referente al maíz el valor más alto y más bajo fue 25 t/ha y 10 t/ha, respectivamente. Por un lado el bofedal

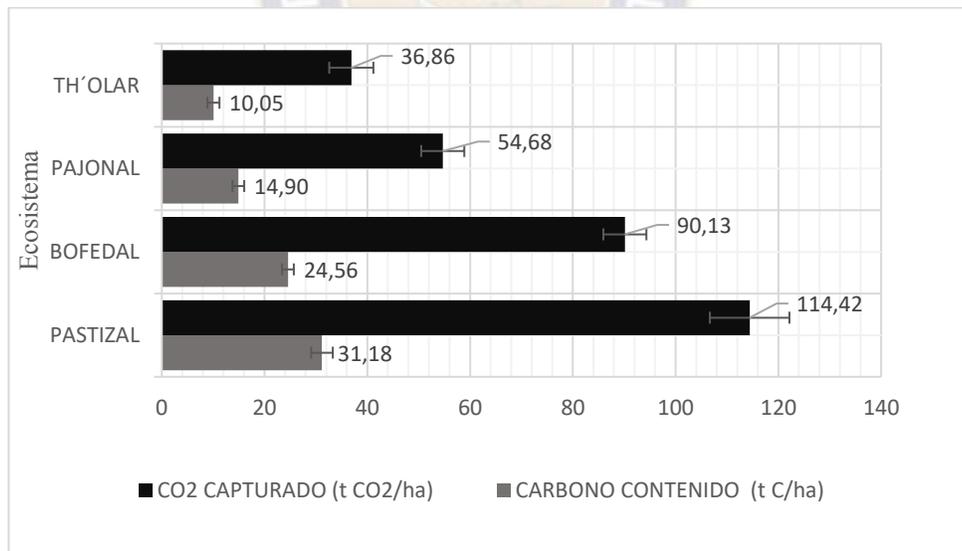
estudiado que tiene el valor más bajo en la parte aérea para nuestro estudio con 7,13 t C/ha, dato intermedio entre la biomasa de la parte herbácea del estudio de Quito (2018), pese al tamaño de las especies del pastizal que son pequeños en comparación con el maíz, estas cubren toda el área sin dejar suelo desnudo. Por otro lado, tenemos al pajonal estudiado cuyo valor de biomasa 23,34 t C/ha es fácilmente comparable con el valor más alto del maíz.

7.2.2. Carbono capturado en la biomasa vegetal del área de estudio.

En la Figura 12 se puede observar la cantidad de carbono correspondientes a la captura por ecosistema. Se estimó mayor contenido de carbono 114,42 t CO₂/ha en el pastizal; seguido de bofedal 90,13 t CO₂/ha y los menores rangos de captura de CO₂ 54,68 t CO₂/ha en pajonal y th'olar con 36,89 t CO₂/ha.

Figura 12

Captura en la biomasa de los cuatro ecosistemas estudiados en términos de Dióxido de carbono (CO₂) y Carbono (C)



Otros estudios hacen referencia a la relación del carbono almacenado en la biomasa vegetal del bajo suelo 19,72 t C/ha y la biomasa aérea 4,77 t C/ha de un bofedal altoandino, alcanzando un total de 24.49 t C/ha (Ccoropuna et al., 2021), este valor es muy comparable con el bofedal estudiado cuyo valor determinado es de 24,56 t C/ha. Asimismo, el contenido de carbono por muestra es menor en la biomasa aérea y mayor en la biomasa subterránea, lo

que concuerda con los resultados de este estudio. Esto puede diferir según el tipo de bofedal dado que el nuestro corresponde a un bofedal con vegetación de tamaño reducido, contrario a lo que ocurre en la Reserva Nacional Salinas (puna seca del suroeste del Perú), donde el bofedal es la formación vegetal donde se concentró la mayor cantidad de carbono almacenado 639,39 t/ha de CO₂ debido a las características propias de su vegetación, seguido del yaretal 98,63 t/ha de CO₂, pajonal 16,84 t/ha de CO₂ y th'olar 4.66 t/ha de CO₂ (Medina y Medina, 2020). Lo último se asemeja a la presente investigación, puesto que la captura de carbono en el pajonal y th'olar son menores que la captura en el bofedal.

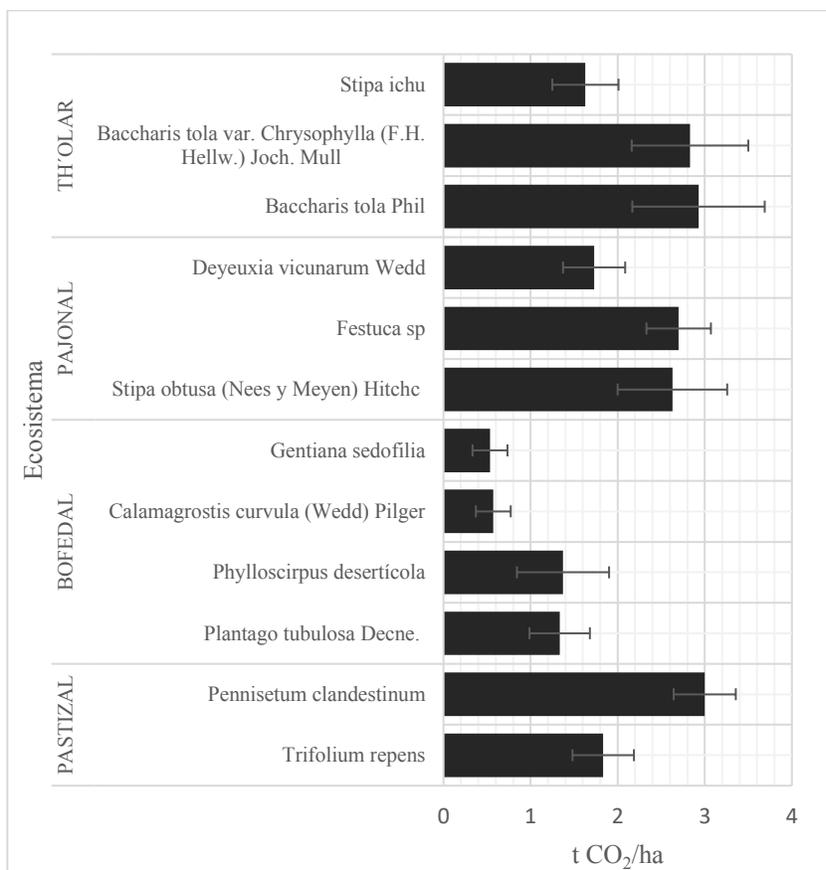
Los resultados de captura en el pastizal 114.42 t CO₂/ha, se asemejan a los que obtuvo Quito (2018) para la captura de carbono total de la biomasa herbácea y del maíz 149,7 t CO₂/ha, pese a ser diferentes ecosistemas en distintas condiciones y características. De igual manera podemos comparar los resultados obtenidos por Surco (2022) en la región amazónica, también de características muy diferentes, donde los valores son más elevados que los del presente trabajo, en el bosque cercano al río Madre de Dios en Perú el carbono capturado fue de 242,63 t C/ha, en una de las parcelas de estudio. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, según sus características de tamaño y edad, los árboles secuestran más carbono en sus componentes.

7.2.2.1 Carbono capturado en la biomasa por especie

Si bien se puede observar el potencial de captura de carbono por ecosistema, a continuación, la Figura 13, muestra el resultado de la cuantificación de carbono capturado para cada especie, expresado en t CO₂/ha. Se registro que las especies del ecosistema pastizal almacenan: *Trifolium repens* 1,83, *Pennisetum clandestinum* 3,00. En el bofedal: *Plantago tubulosa* Decne 1,33, *Phylloscirpus deserticola* 1,37, *Calamagrostis curvula* (Wedd) Pilger 0,57 y *Gentiana sedofilia* 0,53. En el pajonal: *Stipa obtusa* (Nees y Meyen) Hitchc 2,63, *Festuca* sp 2,70, *Deyeuxia vicunarum* Wedd 1,73. En el th'olar: *Baccharis tola* Phil 2,93, *Baccharis tola* var. *Chrysophylla* (F.H. Hellw.) Joch. Mull 2,83 y *Stipa ichu* 1,63.

Figura 13

CO₂ Capturado en la biomasa de cada especie de los ecosistemas monitoreados



En el ecosistema th'olar las especies de baccharis capturan 2,93 y 2,83 t CO₂/ha, estos resultados están dentro de los valores obtenidos por Ponce (2018) en su estudio sobre la captura de carbono en th'olas, que varían de 1,49 t CO₂/ha hasta 18,99 t CO₂/ha. Sin embargo, son relativamente más bajos que los resultados obtenidos por Huallpa (2019), en su investigación en la puna seca del departamento de Puno-Perú, sobre dos especies de th'ola (*Parastrephia lepidophylla* Wedd y *Baccharis incarum* Wedd), donde la mayor captura de carbono se dio en la biomasa aérea (tallos/ramas), capturando en *Parastrephia* 4.66 t CO₂/ha y *Baccharis* 4.35 t CO₂/ha.

Medrano et al. (2012) cuantifican el carbono que almacenan las especies predominantes de flora del lago Junín en Perú, en tres ecosistemas: bofedal, pajonal y total. Por un lado, en el pajonal: *Deyeuxia recta* Kunth almacena 7,02 t C/ha en su biomasa aérea y

1,88 t C/ha en su biomasa radical. Por otro lado, en el bofedal: *Plantago tubulosa* almacena 0,81 t C/ha en su biomasa aérea y 1,88 t C/ha en su biomasa radical, *Eleocharis albibracteata* almacena 0,22 t C/ha en biomasa aérea y 2,95 t C/ha en su biomasa radical, y *Limisella australis* almacena 0,22 t C/ha en biomasa aérea y 0,38 t C/ha en su biomasa radical. En comparación con este estudio, los datos no tienen gran variación, evidenciándose también mayor captura de carbono en la biomasa aérea en el caso del pajonal y de manera inversa en el bofedal. Se demuestra que, según el ecosistema, las plantas pueden absorber más carbono en las raíces, con la más alta formación de biomasa subterránea, dependiendo de la cantidad de humedad en el suelo (Medrano et al., 2012).

Para la especie del pajonal *Festuca sp* se observa que el resultado fue de 2,7 t CO₂/ha, valor que difiere de los valores obtenidos por Flores (2017), con relación a la captura de carbono en una especie de festuca (*Festuca dolichophylla*), donde para el sitio Chiji Mocco Pampa fue de 7,70 t CO₂/ha; y para el sitio Quello Circa Pampa fue 10,78 t CO₂/ha. Ahora bien, en el pastizal la especie representativa de este ecosistema, *Penisetum clandestinum* captura 3,0 t CO₂/ha, este valor es más pequeño que el resultado obtenido por Lopez (2015) de 10.63 t CO₂/ha para el pasto king grass variedad morado.

Los rendimientos pueden ser menores debido a la condición de la especie y su tiempo de crecimiento. Además, la temporada de crecimiento, el género de especies y la ubicación del ecosistema, pueden causar diferencias con investigaciones previas. También se demostró que estas especies juegan un papel crucial en el secuestro de CO₂ atmosférico en el escenario actual de cambio climático, entre otros importantes servicios para el medio ambiente y los seres humanos.

7.3. Carbono fijado en el suelo

A continuación, se detallan los resultados obtenidos en relación al carbono orgánico en el suelo como tal y el carbono de la biomasa microbiana del suelo.

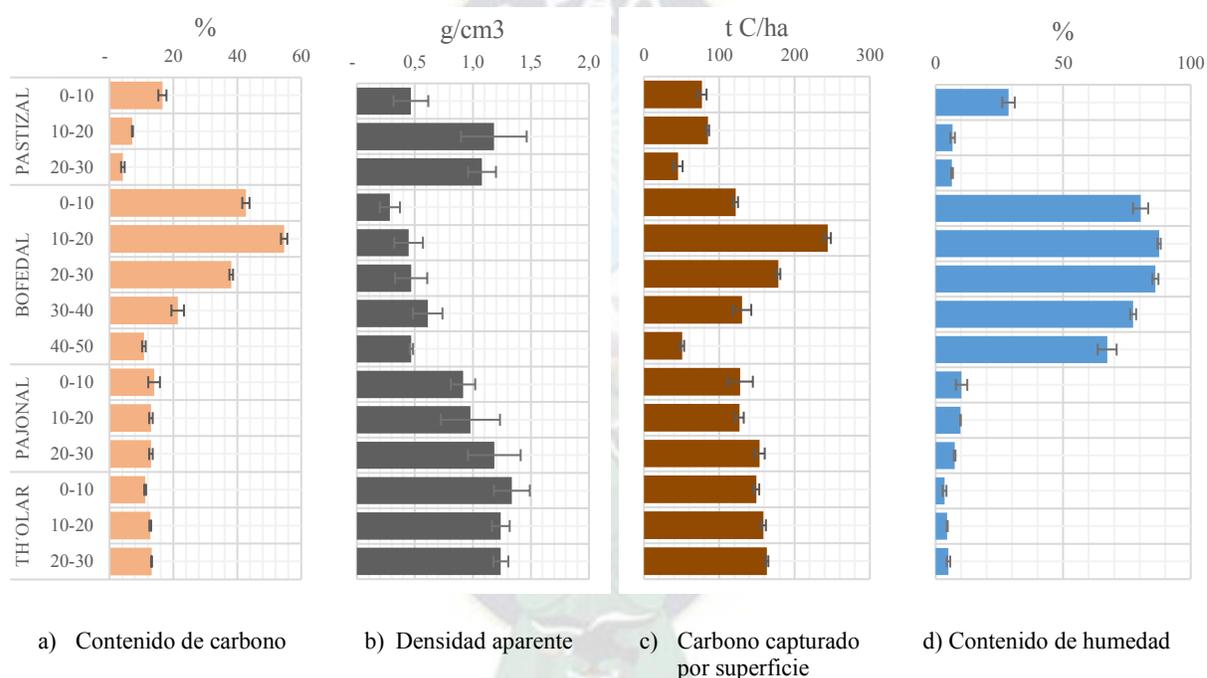
7.3.1. Carbono orgánico capturado en el suelo

En la Figura 14, los resultados del carbono capturado en el suelo en relación con la profundidad se expresan en unidades de t C/ha y se diferencian por ecosistema. Además, se

refleja el comportamiento de la captura, que se asocia con otros factores propios del suelo, como la humedad. Asimismo, se presenta el carbono orgánico del suelo en % y la densidad aparente g/cm^3 , los cuales se utilizaron para el cálculo del carbono capturado en el suelo con la ecuación 4.

Figura 14

Comportamiento del carbono capturado por superficie en el suelo a diferentes profundidades con relación al contenido de humedad, densidad aparente, contenido de carbono.



Para el horizonte 10 – 20 cm, el ecosistema bofedal tiene el valor de captura más alto de 243,83 t C/ha. Del mismo modo, el th'olar tiene un mayor contenido de carbono con 163,40 t C/ha en una profundidad de 20 - 30 cm. Después, con valores similares, se encuentra el pajonal que registro 127,78, 126,96 y 153,66 t C/ha en profundidades de hasta 30 cm. Las cantidades más bajas de carbono capturado en el suelo se observan en el pastizal con valores de 77,16, 84,81 y 45,20 t C/ha hasta los 30 cm.

Se ha informado que las existencias de C en el suelo oscilan entre 470 y 2902 t C/ha en varios humedales de América del Norte (Hernández, 2010). Del mismo modo, Omonte (2022), evaluó el secuestro de carbono a la profundidad de 20 cm y obtuvo los siguientes

resultados 319,91 tC/ha, 166,65 tC/ha 133,68 tC/ha y el mayor dato fue de 959,15 tC/ha a 60 cm para diferentes bofedales altoandinos en Cusco – Perú. En ese sentido, dichos estudios reflejan que los resultados obtenidos en el presente estudio hasta los 50 cm de profundidad del bofedal (725 t C/h) son similares y/o se encuentran en el rango de otras investigaciones realizadas en bofedales altoandinos. Gorretti (2021) obtuvo el valor de 230,22 t C/ha en la localidad de Chojñapata en un área con mayor concentración de carbono a la profundidad de 5 a 20 cm dato que coincide con el obtenido en la misma localidad a la profundidad de 10 a 20 cm de 243,83 t C/ha. Lo anteriormente mencionado puede diferir según la profundidad, se demuestra evidente el alto contenido de carbono en los resultados.

Pari (2021) observó, que en bofedales los valores del contenido orgánico del suelo son los más altos, con medias superiores a las 100 t/ha, seguidos de los forestales exóticos, pastura nativa, y forestales nativos, los que presentan medias inferiores a 50 t/ha. Del mismo modo, Martínez et al., (2013), en un estudio realizado sobre carbono en el suelo para tres horizontes en zonas semiáridas, encontraron los siguientes promedios 30, 224, 162 y 56 t C/ha, resultados que son comparables y similares a los encontrados en los ecosistemas th'olar, pastizal y pajonal.

El contenido de carbono en el suelo puede estar influenciado por varios factores climáticos y antropogénicos, o bien, propios de cada tipo de suelo (Hernández, 2013). Aunque estos factores pueden ser amplios, se pueden observar algunos comportamientos entre los ecosistemas, por ejemplo, un mayor contenido de humedad en el bofedal y un contenido de humedad más bajo en otros. El contenido de humedad está estrechamente relacionado con la densidad aparente y es directamente inversa a la misma.

La densidad aparente es una característica física del suelo propia de cada zona y de cada lugar del altiplano, relacionada estrechamente con la textura del mismo, dependiendo principalmente de la cantidad de arena o arcilla que contenga el suelo, que influye en la acumulación de materia orgánica y otros elementos. Por lo tanto, mientras menor sea la densidad, es más favorable para el almacenamiento de COS (Pari, 2021). Del mismo modo, Chang y Mandarachi (2021), en su estudio realizado en humedales en Perú, indican que la densidad del suelo se encuentra por debajo de 1,3 g/cm³, y que el contenido de materia

orgánica y el contenido de carbono son inversamente proporcionales a este parámetro. De igual modo, sucede en los ecosistemas estudiados en este trabajo, ya que aquellos suelos con valores bajos de densidad aparente resultan tener mayor porcentaje de carbono orgánico.

El carbono capturado por la superficie depende no sólo de la densidad aparente sino también de los valores del contenido de carbono orgánico y de la profundidad, por lo que también se presentan altos valores de secuestro superficial en pajonal y th'olar. Esto se puede explicar por el alto contenido de materia orgánica de estos suelos, que supera el 10%. Según Molina y Meléndez (2002), los suelos con alto contenido de materia orgánica son aquellos cuyo valor es superior al 10%, 5,8% usando el factor de Van Benmelen de 1,724, lo que sugiere que la materia orgánica del suelo contiene un 58% de carbono orgánico (González et al. 2008, citado por Vela et al. 2011).

Quito (2018) indicó que la concentración total de carbono en el policultivo de maíz fue de 149,70 t/ha de CO₂ y 248,732 t C/ha se almacena en el suelo. Lo anterior se comparó con los resultados obtenidos en el presente estudio, donde la variación es de 36,88 a 114,41 t CO₂/ha en biomasa vegetal y 45,20 a 243.84 t C/ha en el suelo para ecosistemas con especies nativas de zonas altoandinas de Bolivia; los cuales se muestran similares con relación al policultivo del maíz. Si bien las condiciones y características son distintas, los usos del suelo de bosques y pastizales son más favorables para el almacenamiento de COS en climas fríos (Valenzuela y Visconti, 2020).

La cantidad de carbono almacenado difiere significativamente entre reservorios en el humedal altoandino de Perú, debido a que el suelo orgánico almacena la mayor cantidad con 218,3 t C/ha (90%), seguido de la biomasa bajo suelo (raíces) con 19,7 t C/ha (8%), y la biomasa aérea (hojas y tallos) con 4,8 t C/ha (2%) (Ccoropuna et al., 2021). Así pues, lo mismo se evidencio en este estudio, donde la captura de carbono en suelo es mayor que la captura en la biomasa.

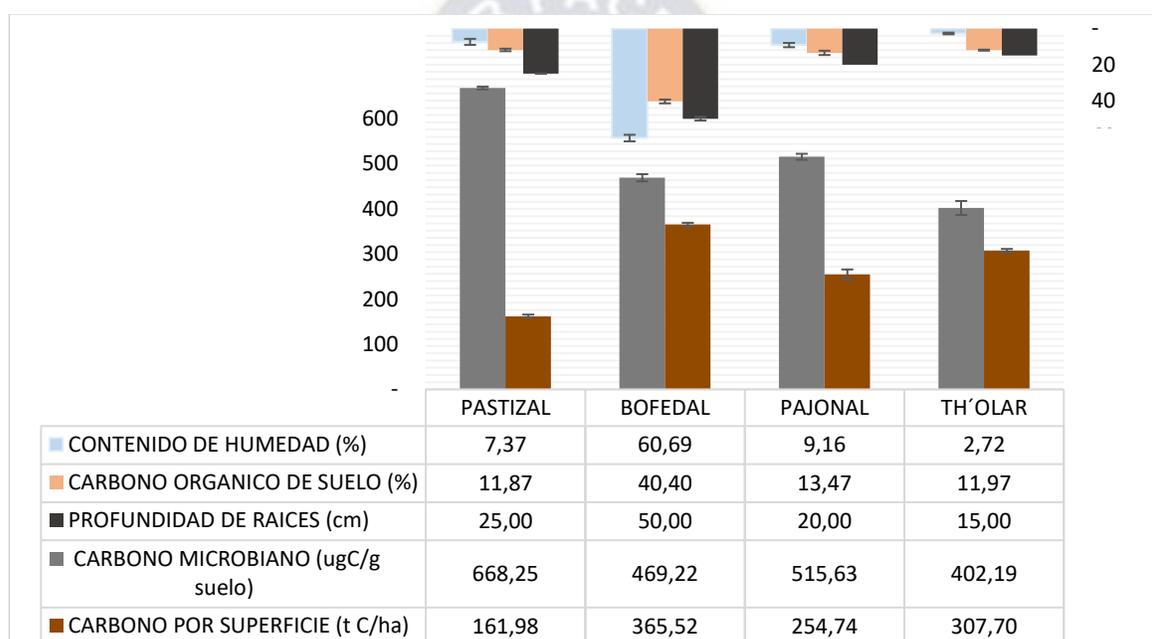
7.3.2. Carbono de la biomasa microbiana del suelo

Si bien ya se expuso la cantidad de C en el suelo es importante determinar los factores que afectan esta variable, considerando que la absorción de carbono está determinada también

por el componente biológico del suelo en horizontes superficiales. Asimismo, la cantidad de carbono contenido en el suelo también está influenciada por la masa microbiana que forma parte de la cantidad total de carbono orgánico del suelo contenido. En la Figura 15, se hace la relación de la presencia de carbono orgánico % y carbono microbiano con otros factores como la humedad (%) y la profundidad de raíces (cm).

Figura 15

Comportamiento de carbono en el suelo con relación a carbono microbiano en los diferentes ecosistemas en una profundidad de 0 a 20 cm



Según Jenkinson (1992) los factores que afectan esta actividad microbiana están determinadas por la humedad y otros componentes físicos propios del suelo (como se citó en Mora, 2006). Ramos y Zuñiga (2007) concluyen en que la actividad microbiana mejora significativamente con el aumento de la humedad. Esto es aplicable para los ecosistemas pastizal, pajonal y th'olar, donde la cantidad de carbono microbiano demuestra relación directamente proporcional con la humedad y profundidad de raíces. Además, el carbono orgánico (%) se muestra similar en estos ecosistemas. Por el contrario, en el ecosistema bofedal donde existe mayor porcentaje de humedad, mayor cantidad de carbono orgánico y mayor extensión de raíces, existe menor cantidad de biomasa microbiana. Dado que, la saturación de agua en el suelo favorece la acumulación de carbono al reducir la tasa de

descomposición del material orgánico (Hernández, 2010). Además, la fuerte acidez presente en algunos bofedales reduce la actividad microbiana (León, 2016).

La presencia de mayores concentraciones de carbono en el suelo refleja la mayor o menor actividad microbiana. Pascual et al. (1997) sugieren que este parámetro sea considerado más bien como un reflejo del potencial de mineralización de la materia orgánica; a menor valor del cociente, menor será la tendencia de la materia orgánica a mineralizarse. Esto se refleja en la Figura 15 para el ecosistema bofedal presenta uno de los valores más bajos en contenido de carbono microbiano 469,22 ugC/g suelo, pero mayor contenido de carbono orgánico %, lo cual indica que existe menor mineralización del mismo.

El ecosistema pastizal muestra una alta capacidad de captura a través de su vegetación. Sin embargo, la captura en el suelo es reducida en comparación a los otros, lo que refleja lo mencionado en el párrafo anterior, ya que al existir mayor cantidad de biomasa microbiana existe mayor descomposición de la materia orgánica. Asimismo, en contra posición a la captura se generará la emisión CO₂ por la actividad microbiana.

Palacio (2020) en un estudio en humedales, determino que el valor de la biomasa microbiana varió entre 3,15 y 32,85 mgC/KgS, manteniendo una relación inversa con la altitud. En concordancia, el bofedal es el área más elevada y registro menor cantidad de biomasa microbiana, y en el caso del pastizal que es la zona más baja presenta la cantidad de carbono microbiana más alta.

Todos los ecosistemas tienen un alto nivel de secuestro de carbono en el suelo, como se puede observar existen varios factores que pueden afectar a su capacidad de absorción. Sin embargo, los suelos húmedos de bofedales son superiores. Los suelos de los bofedales se pueden examinar fácilmente a profundidades de más de 50 cm. Los suelos de otros ecosistemas están limitados porque son en su mayoría rocosos a profundidades superiores a 30 cm. Es importante señalar que el nivel de disponibilidad de agua influye en el desarrollo de las especies vegetales. Como el caso de las plantas de Pajonal y Th'olar, donde hay menos humedad, se ha demostrado un menor desarrollo de la vegetación, además de que los dos últimos ecosistemas se desarrollan sobre suelos con cierto gradiente donde el agua puede drenar más rápidamente. A pesar de las temperaturas más bajas en el bofedal, las especies que

en él se encuentran tienen características fisiológicas que las hacen estables y adaptables a estas condiciones, además es importante tomar en cuenta que en el área estudiada del pastizal la humedad es favorable durante el resto del año; esto no ocurre universalmente en todos los pastizales, sino que depende de su ubicación, a diferencia de los bofedales que retienen su humedad.

7.4. Actividad fotosintética de la vegetación

Finalmente, se recolectaron datos de fluorescencia instantánea de la clorofila (Ft) y eficiencia cuántica del fotosistema II (Qy), dos parámetros que están estrechamente vinculados con el desempeño fotosintético de las plantas. En otras palabras, estos datos reflejan la actividad fotoquímica de cada uno de los cuatro ecosistemas. Estos datos se presentan en dos escalas temporales, diurna y de temporada.

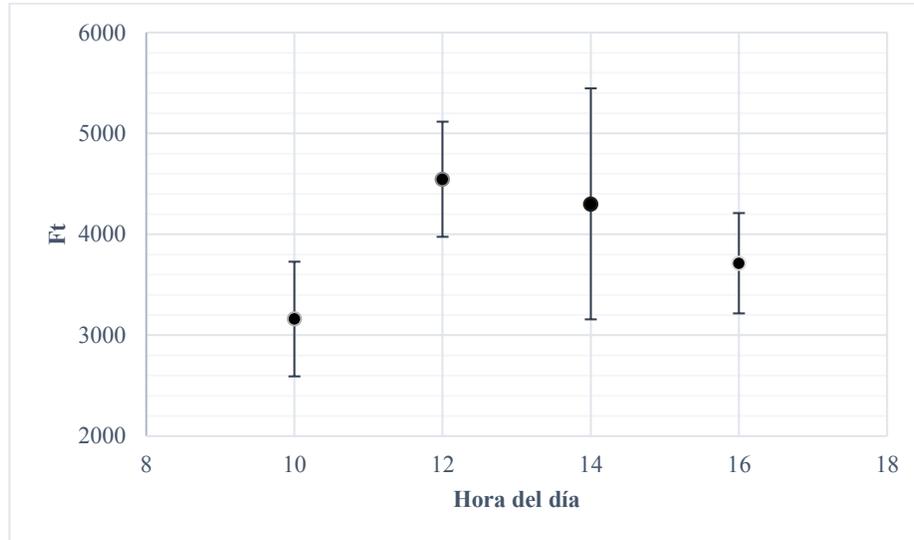
7.4.1. Variabilidad diurna

Los resultados obtenidos en las mediciones a lo largo del día tanto para Ft y Qy, inicialmente fueron sometidas a la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk. Se determinó que los datos de Ft tienen distribución normal ($p:0,183$) y en el caso de Qy no tienen distribución normal ($p:0,01$). El valor p se refiere a la probabilidad de que los datos provengan de una distribución normal si el valor es mayor a 0,05.

El tratamiento que corresponde a los datos con distribución normal (Ft) es el análisis de Tukey, cuyos resultados fueron: sig. 0,06, lo que indica que no existen diferencias significativas estadísticamente hablando, en los valores medios observados en los horarios de monitoreo (sig. $>0,05$). La Figura 16 muestra la variación de los valores promedios de Ft (fluorescencia instantánea de clorofila) a lo largo del día. Asimismo, con el fluorómetro se pueden obtener datos de 12:00 a 16:00 horas con menor variabilidad en la media obtenida, como se puede observar.

Figura 16

Comportamiento de las medias de la variable Ft (fluorescencia instantánea de la clorofila) a lo largo del día en el ecosistema pastizal

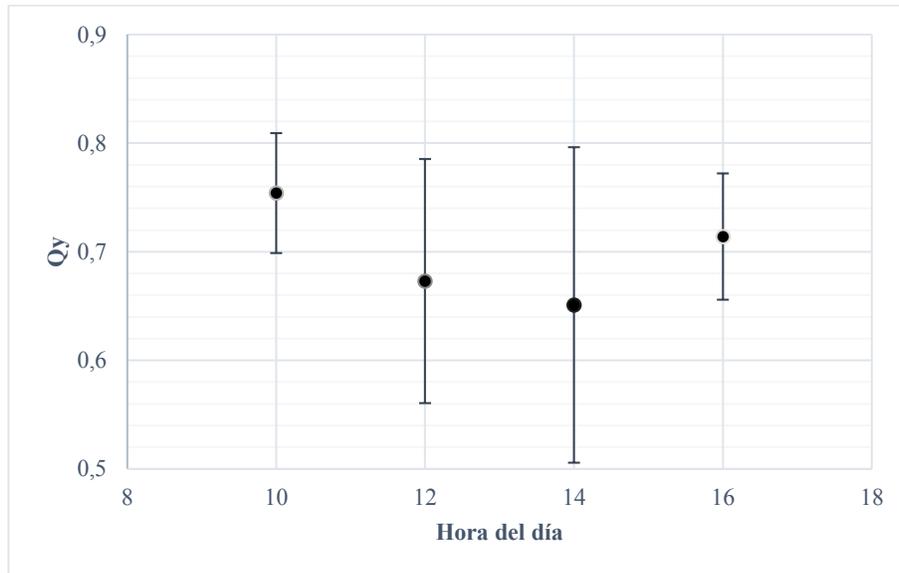


Callejas et al. (s.f.) afirmó que, para las condiciones de crecimiento de las plantas de Atacama, es probable que el porcentaje de emisión de luz azul se mantenga sin cambios a lo largo del día, lo que da como resultado valores iguales en las mediciones, independientemente de cuándo se tomen. Esto último no es del todo comparable, básicamente porque el ecosistema pastizal cuenta en su alrededor con árboles y arbustos que pueden brindar momentos de sombra y frescor a determinadas horas del día. Puesto que la fluorescencia es una forma de fotoluminiscencia que se produce luego de iluminar el material con luz y es proporcional a la luz absorbida (AGS Analytica S.A, 2023). Entonces esto podría explicar el aumento de Ft al mediodía cuando las hojas están más expuestas a la luz solar debido a la posición del sol.

Para el procesamiento de datos de la variable Qy corresponde a la prueba estadística no paramétrica anova de H. Kruskal-Walis, resultando sig: 0,051, que indica que las medias registradas son estadísticamente iguales (sig. >0,05). Entre las horas 12:00 hasta 16:00 se puede obtener datos con menor variabilidad de las medias, tal y como se puede apreciar en la Figura 17.

Figura 17

Comportamiento de las medias de la variable Q_y (rendimiento cuántico del fotosistema II) a lo largo del día en el ecosistema pastizal



Barrantes (2000), en su estudio sobre los efectos de la exposición al dióxido de azufre sobre el aparato fotosintético, observó que el índice Q_y presentaba los valores más altos por la mañana y los más bajos a mitad del día, con una recuperación en la tarde. Tal y como sucede en esta investigación para las mediciones de Q_y . Así también, Barrantes (2000) menciona, que los cambios en F_v/F_m (Q_y) durante el día son causados principalmente por cambios en la fluorescencia máxima (F_m).

En general, las mediciones diurnas relativas a F_t aumentan a mitad del día, a diferencia de Q_y , que disminuye a mediodía. De manera similar, Barrantes (2000) señaló que la disminución de Q_y al mediodía se debe al aumento de la radiación solar durante este período, consistente con los resultados presentados en este trabajo, y puede ser causado por el estrés relacionado con la exposición intensa a la luz solar. Este tema se tratará con más detalle en el siguiente punto. Por último, no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de F_t y Q_y registrados durante el día. De esta forma, los datos registrados durante la temporada pueden considerarse adecuados para el análisis, sin que la hora sea un factor que afecte los resultados finales de la presente investigación.

7.4.2. Variabilidad por temporada

En los cuatro ecosistemas estudiados se obtuvieron datos con relación a Ft y Qy. Posteriormente, para el análisis estadístico de los datos, las variables aleatorias Ft y Qy se sometieron inicialmente a la prueba de normalidad de Kolgomorov-Smirnov. De esta forma, para Ft obtenemos p: 0,01, para Qy tenemos p: 0,00, ambos menores que 0,05. Por tanto, ambas variables no tienen una distribución normal. De igual forma se probó la normalidad de las variables independientes de temperatura, humedad, precipitación y radiación solar, obteniendo valores de significancia iguales a 0, los cuales se consideran menores a 0.05. Entonces, ninguna de ellas tiene una distribución normal. Por esta razón, se utilizó una prueba rho de Spearman no paramétrica.

Análisis de correlación de Ft con condiciones climáticas de los ecosistemas

Según la prueba de Rho de Spearman para la variable Ft con los factores climáticos, los coeficientes de correlación, número de datos (N=180) se pueden ver en la Tabla 3.

Tabla 3

Correlaciones entre variables climáticas con Ft (Fluorescencia instantánea de la clorofila)

VARIABLES CLIMÁTICAS	ESTADÍSTICOS	DÍA DEL MONITOREO	DÍA PREVIO AL MONITOREO	DOS DÍAS PREVIOS AL MONITOREO
Humedad		-0,224**	-0,227**	-0,195**
Radiación solar	Coeficiente de correlación	0,119	0,023	-0,005
Temperatura media		0,592**	0,562**	0,550**
Precipitación		-0,138	0,038	0,139

En la Tabla 3 se puede observar que existe una relación inversa media para la humedad con respecto a Ft, que luce casi igual que el día anterior y se reduce a los dos días anteriores. La relación entre la radiación solar y Ft es débil y directa, por lo que no se los vincula fuertemente, en el mismo día de la medición. En cuanto a la dependencia de la temperatura media con Ft, es la única correlación directa considerable. También, se observó que la relación con la temperatura no cambió mucho en los días previos. En el caso de la precipitación, la relación es débil, mostrando un aumento dos días antes de la medición, lo que puede estar

relacionado con la capacidad de campo, es decir, el agua para las plantas estará disponible después de aproximadamente 48 horas (Shakson y Barber, 2005). Sin embargo, los coeficientes de correlación por debajo del 0.5 no constituyen datos influyentes y de gran impacto.

Análisis de correlación de Qy con condiciones climáticas de los ecosistemas

La variable Qy presenta distribución no paramétrica. Por lo tanto, el estadístico empleado fue Rho de Spearman. Así mismo, los coeficientes de correlación, número de datos (N=180), se pueden ver en la Tabla 4.

Tabla 4

Correlaciones entre variables climáticas con Qy (Eficiencia Cuántica)

Variables climáticas	Estadísticos	Día del monitoreo	Un día previo al monitoreo	Dos días previos al monitoreo
Humedad		0,132	0,077	0,097
Radiación solar	Coeficiente de correlación	-0,187*	-0,176*	-0,156*
Temperatura media		0,262**	0,276**	0,336**
Precipitación		0,150*	0,100	0,106

En la Tabla 4 se observa los coeficientes de correlación por debajo de 0,5, que pueden considerarse no influyentes. En el caso de la humedad con Qy que tiene una relación directa débil y disminuye para días previos. La radiación solar con respecto a Qy, existe una relación inversa débil. La temperatura media y Qy existe una relación directa media, aumentando con la influencia de las condiciones ambientales de los días anteriores. Finalmente, la relación con la precipitación disminuye, pero no significativamente respecto a días anteriores, mostrando una relación directa débil.

Se puede decir que en este análisis las condiciones climáticas no reflejan impacto directo con Ft y Qy. Sin embargo, los eventos climáticos extremos podrían tener un impacto negativo en el sistema fotosintético, por lo que no se deben ignorar estas relaciones directas o indirectas. Asimismo, los factores climáticos se encuentran estrechamente relacionados entre sí, de manera que podrían influir de manera indirecta sobre la planta. Además, como se ve más

adelante, existe un cambio con la temporalidad, por lo que es importante realizar más investigaciones sobre estas relaciones.

F_t aumenta al aumentar la radiación solar, ya que es un parámetro estrechamente relacionado con la luz solar disponible para la planta como también se vio en la variabilidad diurna. En línea con esto Manrique (2003) señala que para hojas con una cantidad constante de clorofila, la fotosíntesis aumenta linealmente con la radiación incidente sólo hasta el punto donde la hoja ya no absorbe más CO_2 por mucho que se incremente la luz disponible. La consecuencia final es que gran parte de la energía absorbida por las clorofilas no puede transferirse al sistema fotoquímico y debe disiparse de forma inofensiva (fluorescencia o calor) (Manrique, 2023).

Q_y al contrario de F_t disminuye durante los períodos en los que se mide una mayor radiación solar, teniendo un efecto opuesto y adverso sobre Q_y . Manrique (2003) menciona que la cantidad de fluorescencia incrementa si la transferencia o el proceso fotoquímico está limitado por algún factor o en condiciones de luz excesiva, lo que conduce a una sobrecarga de electrones excitados, cuyo destino puede ser muy perjudicial para la propia célula. Esto quiere decir que las plantas expuestas a una determinada intensidad de luz están condicionadas por este factor; sin embargo, los cambios extremos en la intensidad de la luz pueden causar no solo cambios en el contenido de clorofila (Nagel 2006), sino también fotoinhibición (Casierra-Posada 2007) (citado por Casierra et al. 2012). Al respecto, Barrantes (2000) señaló que la disminución de la eficiencia fotoquímica (Q_y) puede ser causada por dos procesos diferentes que muchas veces son difíciles de distinguir. Por un lado, el proceso de regulación de la actividad del fotosistema II, que está asociado a la función de defensa causado por exceso de luz y por otro, lado el daño al centro de reacción del fotosistema II.

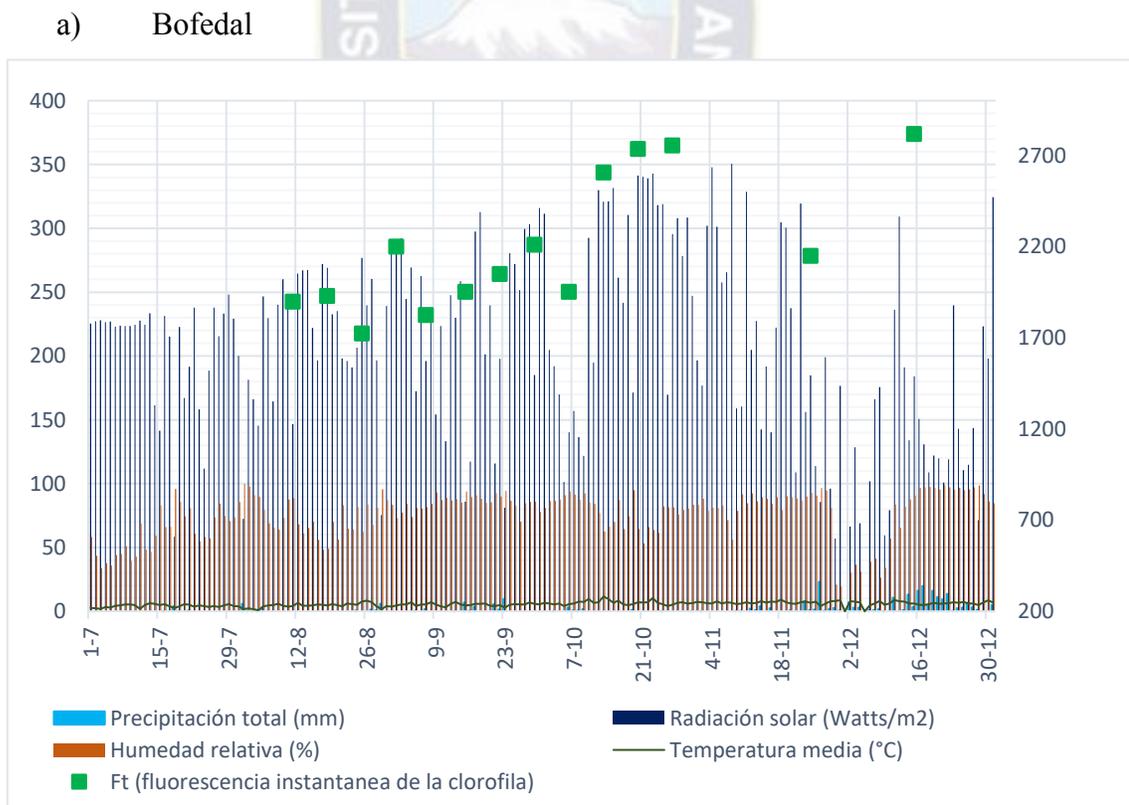
Barrantes (2000), menciona que la época del año también es importante: por ejemplo, en el verano de 1996 se produjo un mayor descenso de Q_y respecto a la primavera del mismo año, aunque los valores máximos de PAR registrados fueron inferiores. Otra investigación relacionada con el estudio de la clorofila en las hojas de variedades de uva de mesa donde Callejas et al. (s.f.) afirma, que la evolución del contenido de clorofila se puede observar dependiendo de la posición de la lámina en el brote, así como de la fecha de evaluación de las

variedades Flame Seedles y Thompson Seedles. En ambas variedades, generalmente durante la temporada (inicio de floración) el contenido de clorofila disminuye. Este último punto implica que existen variaciones en la actividad fotosintética a lo largo de las diferentes estaciones, a medida que cambian las condiciones climáticas.

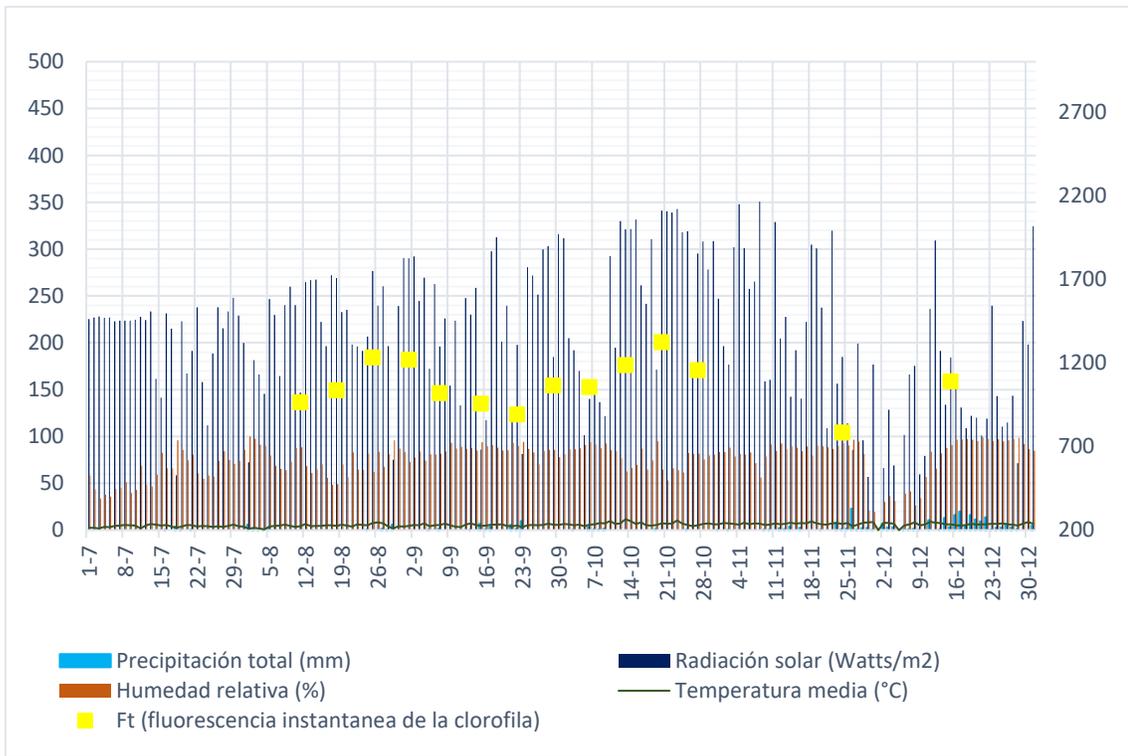
Para describir el comportamiento de la actividad fotosintética en diferentes ecosistemas de zonas altoandinas, se crearon gráficos que representan el comportamiento a lo largo del período de monitoreo. Se muestran los datos de precipitación, radiación solar, humedad relativa, temperatura media con relación a los parámetros de fluorescencia Ft y Qy en los ecosistemas estudiados. (Figuras 18 y 19).

Figura 18

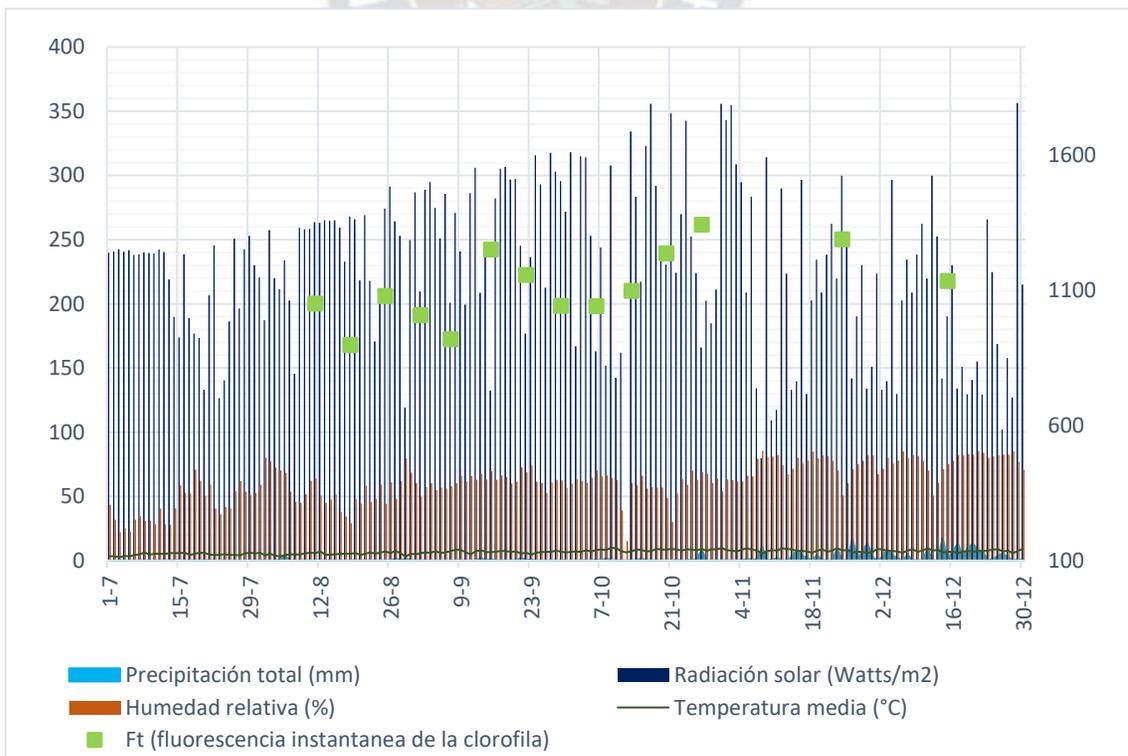
Fluorescencia instantánea de la clorofila (Ft) con relación a los factores climáticos en los diferentes ecosistemas



b) Pajonal



c) Thólar



d) Pastizal

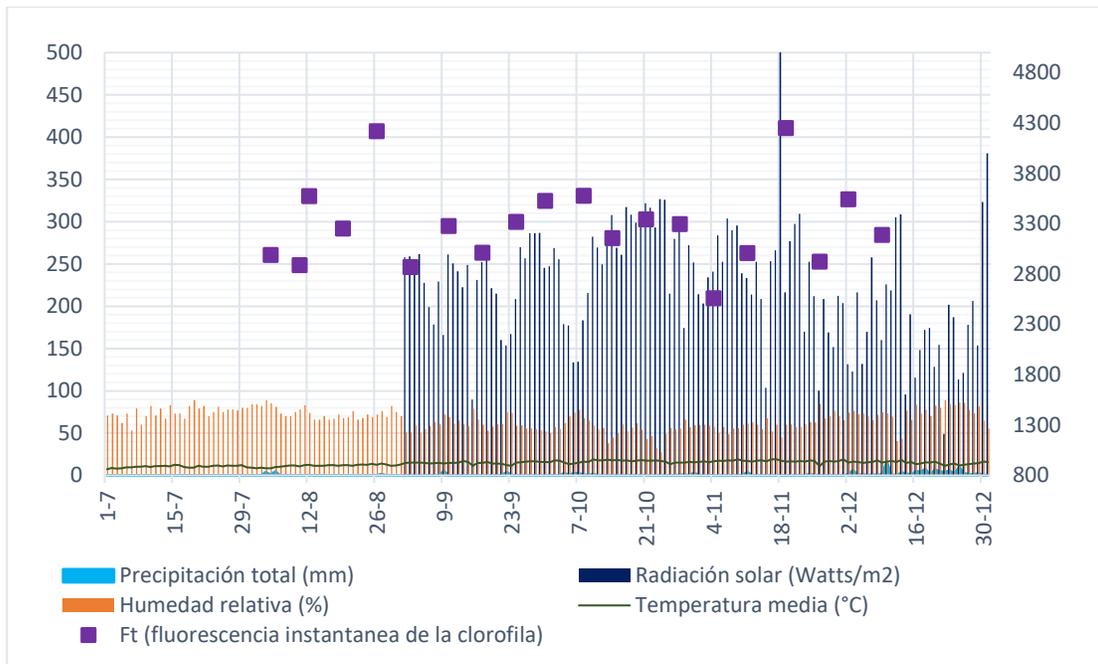
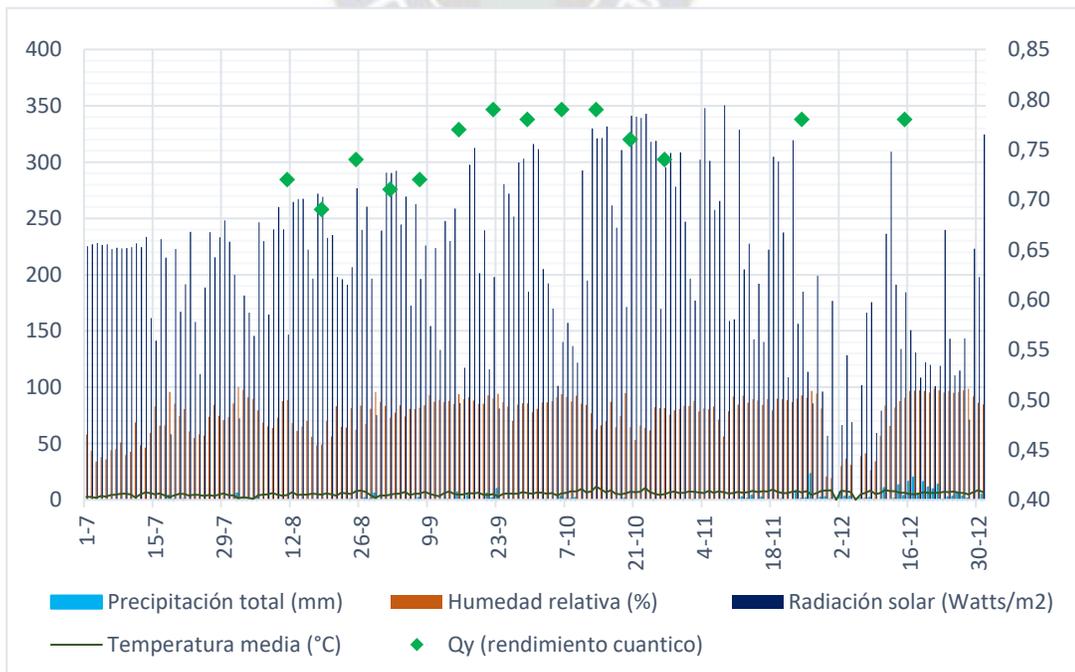


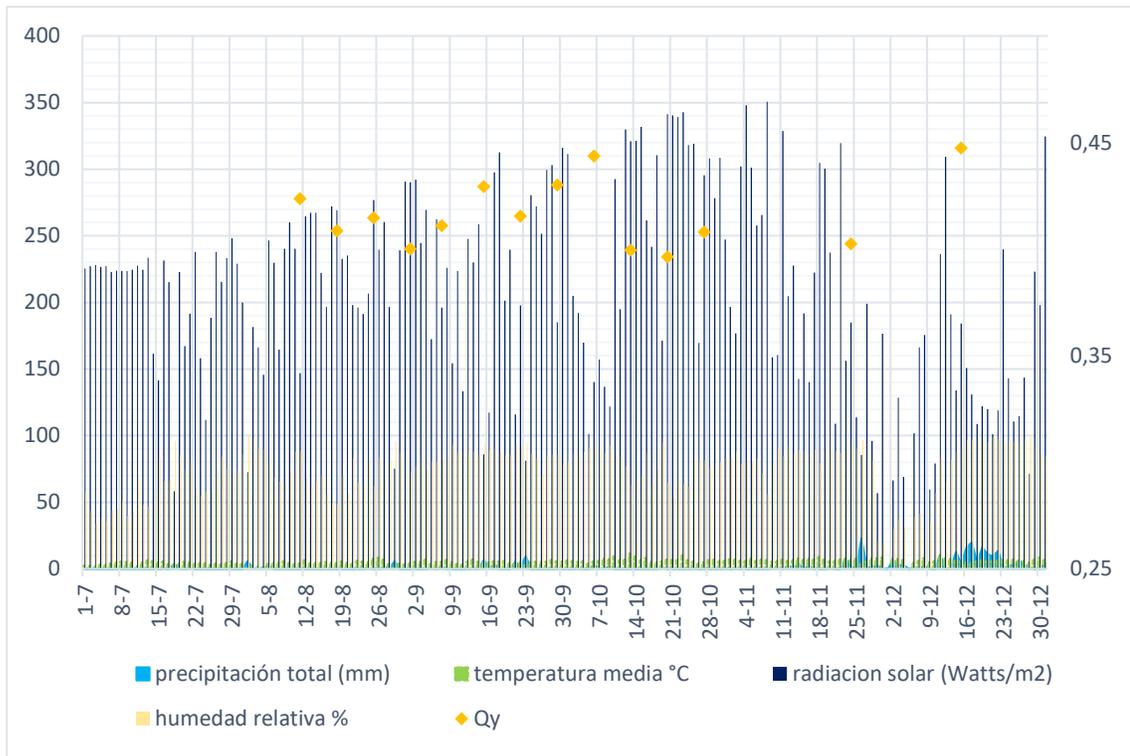
Figura 19

Rendimiento cuántico (Q_y) con relación a los factores climáticos en los diferentes ecosistemas

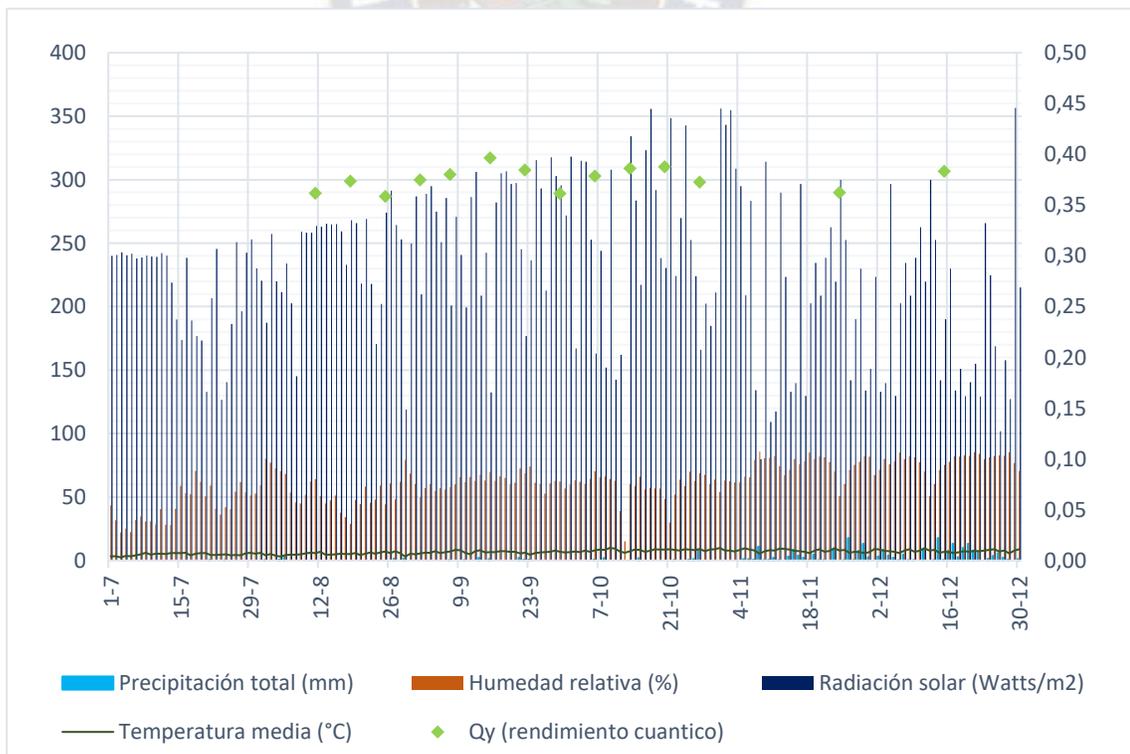
a) Bofedal



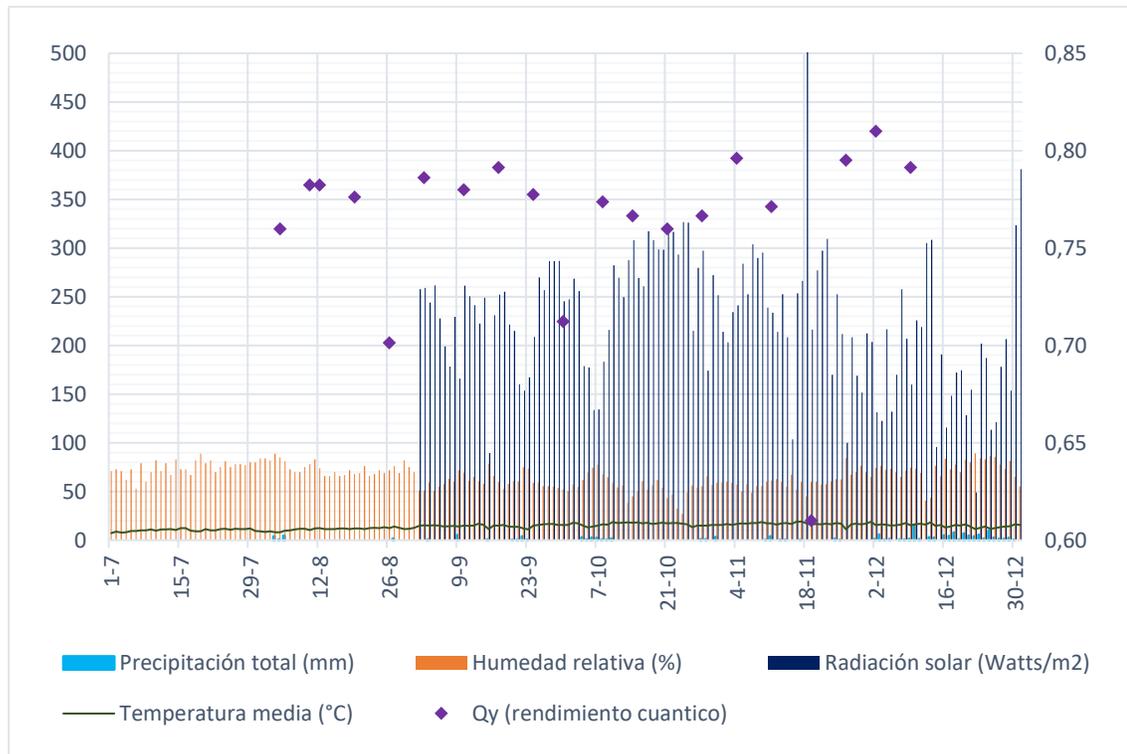
b) Pajonal



c) Th'olar



d) Pastizal



Observamos que los valores elevados de Ft coinciden con los días con las temperaturas más altas registradas. Además, durante el período de medición, los datos de Ft muestran una dinámica creciente, al igual que la temperatura media. Ya que los pastizales presentan las temperaturas promedio más altas, las cuales van de 8 a 18 °C, en el th'olar entre 5 y 8 °C, en pajonal y bofedal entre 4 y 11 °C. Así también, los valores más altos de Ft y Qy se registraron en el pastizal (ver Figuras 20 y 21) en comparación con los demás ecosistemas. En línea con lo anterior, Sanfuentes et al. (2012) señalaron que, debido a las diferentes limitaciones abióticas encontradas a lo largo de los gradientes altitudinales, se predice que el aumento de las temperaturas tendrá efectos positivos en la fotosíntesis de la planta altoandina *Phacelia secunda* en altitudes elevadas y efectos negativos en plantas de tierras bajas.

Los ecosistemas de pastizal y tólar recibieron menos precipitaciones durante el período de monitoreo, siendo el ecosistema de pastizal el que tuvo el mayor número de días con registro de precipitación. Estos también fueron los ecosistemas que registraron menores valores con respecto a las variables Ft y Qy. Los ecosistemas de pastizal y bofedal registraron

valores más altos de Ft y Qy, lo que puede deberse a la capacidad de la planta para optimizar su capacidad fotosintética por el incremento de factores como la temperatura y humedad.

En las Figuras 20 y 21 se puede observar el desarrollo de los parámetros de fluorescencia Ft y Qy durante el periodo de muestreo.

Figura 20

Desarrollo de Ft (fluorescencia instantánea de la clorofila) durante el tiempo de muestreo para los diferentes ecosistemas

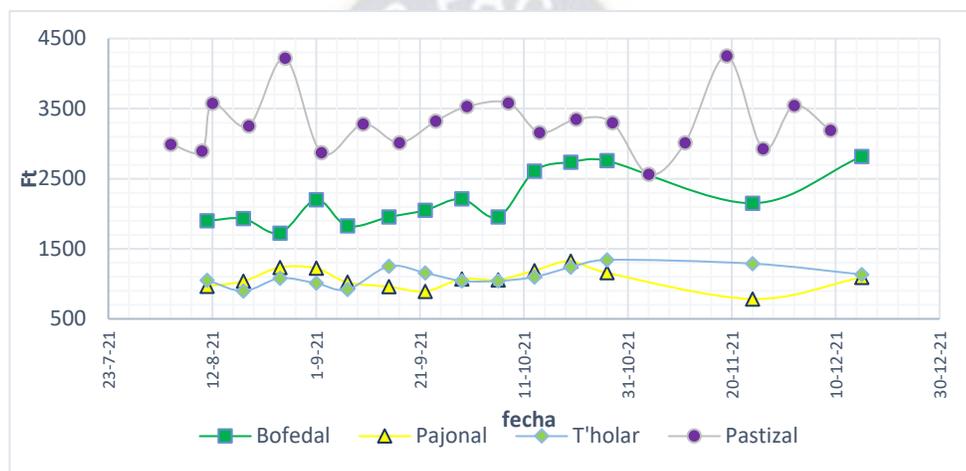
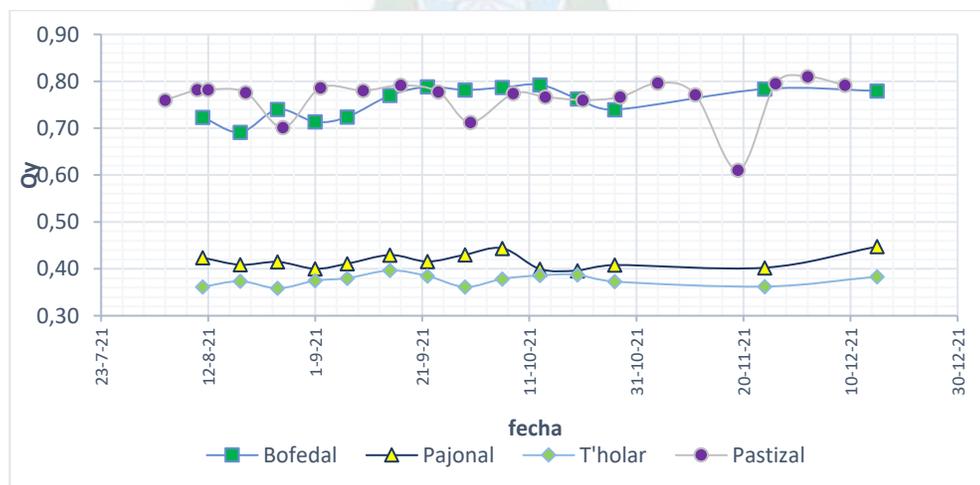


Figura 21

Desarrollo de Qy (rendimiento cuántico) durante el tiempo de muestreo para los diferentes ecosistemas



Qy y Ft muestra valores más altos en el ecosistema pastizal y bofedal, seguido de pajonal y finalmente th'olar. También se muestran los valores más altos de Ft en el pastizal, seguida por bofedal, th'olar y finalmente con el pajonal. Estas estadísticas quedaron objetivamente demostradas al momento del muestreo, observándose una mayor coloración verde en el ecosistema pastizal y bofedal, lo que indica mayores concentraciones de clorofila. Por el contrario, en los ecosistemas pajonal y th'olar se registra menor captura de CO₂ por la vegetación. Por lo tanto, se espera que la actividad fotosintética sea menor en las especies presentes debido al color relativamente amarillento de las pajas.

Los valores de Qy oscilan entre 0,75 y 0,85 para plantas sanas y bien hidratadas (Butler y Kitajima, 1975; Bjorman y Demming, 1987, citado por Barrantes, 2000). Esto sugiere que las plantas de nuestro ecosistema están expuestas a determinadas condiciones que provocan una disminución de su capacidad fotosintética y de su salud en determinados momentos del día o incluso en diferentes días. Sin embargo, otros estudios reportan que un valor de 0,6 puede ser normal en ciertos genotipos de especies de plantas de girasol (Ghobadi et al., 2013 citado por Jimenez et al., 2015), indicando este último que para algunas especies de plantas el valor está por debajo de 0,75 es normal según su estructura genética. Esto puede ocurrir especialmente en especies del pajonal y th'olar cuyos valores de Qy son muy bajos.

En este trabajo se han considerado especies perennes en su totalidad, esto evidencia menor impacto en la eficiencia fotosintética en comparación con las especies anuales que podrían perder su capacidad fotosintética con condiciones climáticas adversas. Estas especies representativas del altiplano boliviano son de gran importancia.

En general, los resultados obtenidos en el presente estudio reflejan como influyen las condiciones ambientales bajo las cuales se desarrollan las plantas, en la estación seca hasta la transición a la estación húmeda. Sobre este contexto, se observó el efecto positivo del aumento de la temperatura media. Sin embargo, otras condiciones climáticas como humedad, precipitación y radiación solar también influyen, ya que en el altiplano y en cualquier otro ecosistema cada uno de estos factores ambientales se encuentra muy relacionados uno con el otro. Así también, Miranda et al. (2015) mencionan que, los factores termodinámicos, geográficos, geomorfológicos, y la presencia de obras civiles pueden condicionar la dinámica

de las variables climáticas como la temperatura, humedad relativa, precipitaciones viento y presión, entre otras. Es decir, se trata de factores que pueden influir en el desarrollo de las especies, como en el pastizal el cual se encuentra dentro de un área urbana y tiene influencia antropogénica debido a las diversas actividades que eventualmente se desarrollan en esta zona.

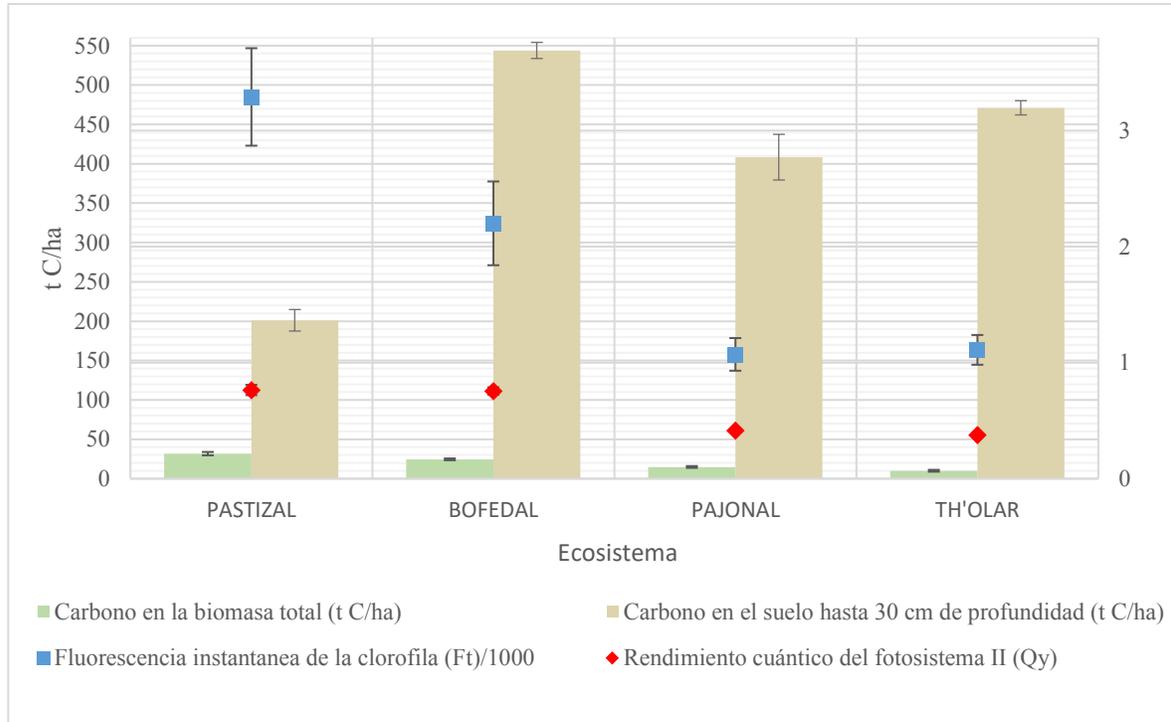
Uno de los efectos del calentamiento global es el aumento del CO₂ atmosférico y un aumento gradual de la temperatura de la Tierra. Es así, que Saugier y Pontailier (2006) mencionan que un aumento del CO₂ atmosférico podría contribuir a la producción de cultivos. Asimismo, en el presente estudio se muestra y ya se menciona que el aumento de la temperatura tiene un impacto positivo en el desempeño de las plantas, sugiriendo que las especies vegetales provenientes de zonas andinas de gran altitud son valiosas, benéficas y útiles en el contexto del calentamiento global y podemos afrontarlo en estas condiciones, que pueden darse en el futuro, para desarrollar y capturar carbono. Sin embargo, las bajas temperaturas en las grandes altitudes ralentizan la descomposición de la materia orgánica, por lo que si hay un aumento muy brusco, esto significaría un efecto negativo y una pérdida de reservas de carbono.

Comportamiento de la captura de carbono y la actividad fotosintética medida a través de los parámetros de fluorescencia Ft y Qy.

Los resultados demuestran que los ecosistemas altoandinos constituyen adecuados sumideros de carbono. A continuación, se presenta la Figura 22 muestra los valores de captura en la vegetación y el suelo, así como los parámetros de fluorescencia y los compara para diferentes ecosistemas, para un análisis más completo.

Figura 22

Comportamiento de la captura de carbono en biomasa vegetal y suelo, y los parámetros de fluorescencia Ft (fluorescencia instantánea de la clorofila) y Qy (rendimiento cuántico del fotosistema II), relacionados con la dinámica fotosintética de las especies estudiadas en los diferentes ecosistemas



Casualmente, la cantidad de carbono capturado en la biomasa vegetal, al igual que la actividad fotosintética evaluada mediante los parámetros de fluorescencia Ft y Qy, tiene sus valores más altos en el pastizal, seguido del bofedal, el pajonal y finalmente el th'olar. Por tanto y lógicamente, resulta que los parámetros de fluorescencia están directamente relacionados con la cantidad de carbono capturado para formar la biomasa de su vegetación. Asimismo, se ha demostrado la relación entre el buen desarrollo de las plantas y la actividad fotosintética.

Como se puede observar, el bofedal es uno de los ecosistemas que captura mayor cantidad de carbono, aunque su vegetación es pequeña en la parte superficial, es extensa en la parte subterránea y esto favorece a la acumulación de materia orgánica. Pues bien, los bofedales tienen una capacidad para secuestrar carbono en suelo y vegetación por unidad de

área mucho mayor que otros sistemas de humedales, ya que lo almacenan con emisiones mínimas de gases de efecto invernadero (GEI), porque los sulfatos inhiben la producción de metano. (Magenheimer y otros, 1996; Mitsch y Gosselink, 2000; Bridgham y otros, 2006; Moreno y otros, 2010, como se cita en Pari, 2021).

Mientras tanto, los ecosistemas pajonal y th'olar también muestran su aporte con grandes cantidades de carbono capturado en el suelo debido a su alto contenido de materia orgánica. Por último está el pastizal y esto puede deberse a diversos factores, sobre todo porque es la zona que más cambios ha experimentado al estar ubicada en una zona urbana, la perturbación de este terreno puede resultar en la pérdida de reservas de carbono. Además, en los pastizales es claramente visible una alta actividad microbiana, lo que supone descomposición y pérdida de materia orgánica (Pascual et al., 1997).

Podwojeski y Poulenard (2000) señalan que los pocos estudios realizados en zonas altoandinas del continente observaron que los ecosistemas de páramo son importantes sumideros de carbono y que estos pueden contribuir a la mitigación de gases de efecto invernadero. Las bajas temperaturas en las mismas zonas reducen la tasa de descomposición de la materia orgánica. El proceso es lento y el inventario de hojarasca y biomasa disminuye, lo que permite almacenar carbono. Las praderas nativas estudiadas superan la cantidad de carbono capturado de algunos bosques. Por ejemplo, los donde Dupouey et al. (1999) encontraron una captura de carbono total promedio de 137 t C/ha y los bosques tropicales cerca de Manaos (Brasil) donde IPCC (2000) informó que el total de carbono en el sistema es 447 t/ha (citado en Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2002).

La conservación y buen manejo de los ecosistemas altoandinos es fundamental, porque contribuyen a la captura de carbono. Además, si es necesario establecer una práctica prioritaria es el establecimiento de las pasturas en zonas áridas ya que proporcionan una barrera a la desertificación y la erosión. Al mismo tiempo, aporta otros beneficios importantes a la calidad del suelo, los cultivos y la calidad del medio ambiente, así como para el fortalecimiento de la biodiversidad (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2002).

La expansión de las áreas agrícolas y el sobrepastoreo significaría un efecto negativo sobre los ecosistemas altoandinos. Esto significa que la perturbación y el aumento del uso inadecuado de la tierra como se mencionó anteriormente, podrían significar la pérdida de este carbono almacenado en suelos de zonas altoandinas y ecosistemas tan importantes como los bofedales, lo que significaría un impacto negativo en el ciclo del carbono y contribuiría al cambio climático. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2002), indica que para que ocurra un verdadero impacto contra el cambio climático los sumideros deben ser permanentes. Asimismo, menciona que el aumento y resguardo de materia orgánica del suelo se asocia a la agricultura de conservación e incluyen la labranza mínima o nula y el uso de una cubierta vegetal continua y protectora formada por material vegetal vivo o muerto. También, medidas como la introducción de nuevas variedades o una adecuada gestión agronómica y rotación de cultivos también ayudan a prevenir la pérdida de materia orgánica (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2002).

Dentro de los ecosistemas altoandinos una práctica muy recurrente es el uso de praderas para el pastoreo (Genin y Alzerreca, 1995), y tal como se observa en los Anexos F, G, H e I, la mayoría de las especies de plantas disponibles se utilizan principalmente como alimento. Lo anterior contribuiría a la perturbación de los ecosistemas. Pero una solución utilizada para un manejo adecuado de pasturas es el control del pastoreo -intensidad, frecuencia, estacionalidad (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2002).

8. CONCLUSIONES

En base a nuestros resultados se concluye que en el ecosistema bofedal las especies vegetales más predominantes son *Phylloscirpus deserticola* y *Plantago tubulosa* Decne. En el pajonal de igual forma la especie con mayor presencia es *Stipa obtusa* (Nees y Meyen) Hitchc y de *Festuca sp* y menor presencia *Deyeuxia vicunarum* Wedd. En el th'olar predominan dos especies de baccharis (th'olas). En el pastizal la especie predominante es *Penisetum clandestinum*. Los ecosistemas con menor cobertura vegetal resultan ser el pajonal y th'olar mostrando un porcentaje de área sin cobertura vegetal mayor al 40%. En cada ecosistema existe al menos una especie de la familia poaceae. Análogamente los ecosistemas pastizal y pajonal tienen cubierto a 100% su suelo por vegetación, pese al tamaño reducido de las especies vegetales presentes en estos ecosistemas, estas muestran gran extensión en cuanto a la parte subterránea (raíces), lo que influye bastante en la captura de carbono. En cuanto a la fisiología vegetal, todas las especies identificadas son de ciclo biológico perenne demostrando su importancia en las zonas altoandinas.

El mayor valor de captura de carbono en la biomasa vegetal se presentó en los ecosistemas pastizal (31 t C/ha ó 114 t CO₂/ha), seguido del bofedal (24 t C/ha ó 90 t CO₂/ha), no gracias al tamaño de las plantas, sino a la abundancia de su vegetación y a la extensa biomasa que forma sus raíces. Posteriormente, se encuentra el pajonal con un menor valor de captura (14 t C/ha ó 54 t CO₂/ha) y finalmente, el ecosistema que menor registro de fijación de carbono obtuvo fue el th'olar (10 t C/ha ó 36 t CO₂/ha). Ambos ecosistemas con menor extensión de raíces, pero mayor carbono capturado en su biomasa aérea.

Los suelos del bofedal son los que fijan mayor carbono, en el horizonte superior considerado hasta los 30 cm de profundidad con 543 t C/ha, aunque pueden capturar carbono a mayores profundidades, debido a diferentes factores que favorecen la acumulación de materia orgánica como la humedad y baja densidad aparente. Los suelos de los ecosistemas th'olar y pajonal muestran valores similares con valores de 471 t C/ha y de 408 t C/ha respectivamente. Finalmente, el pastizal resultó ser el ecosistema con menor fijación de carbono en suelos con un valor de 207 t C/ha, debido a los diferentes factores que pueden afectar en el contenido de materia orgánica, tales como su ubicación. Con relación a estos resultados se puede concluir que el mayor potencial de captura de carbono radica en los suelos

de las zonas altoandinas, debido a las características propias de la zona que ayudan al almacenamiento de carbono. En cuanto a el carbono de la biomasa microbiana, constituye un porcentaje muy reducido (menor al 0,1%) del carbono total del suelo. Sin embargo, su importancia radica en la influencia sobre la pérdida o descomposición de la materia orgánica del suelo.

Los parámetros de fluorescencia Ft y Qy mostraron un mínimo aumento con el transcurso de la temporada, pudiendo atribuirse este comportamiento a la época de monitoreo es constituye en la transición a la estación húmeda donde las especies vegetales tienden a desarrollarse más favorablemente. Asimismo, el aumento de la temperatura media podría afectar positivamente a dichos parámetros, por lo tanto, a la eficiencia fotosintética de las especies vegetales presentes en los ecosistemas de la zona altoandina, debido a la fisiología de las plantas que los colonizan. De igual manera, la radiación solar excesiva podría provocar un estrés en las plantas. Por lo anterior el ecosistema con mayor actividad fotosintética es el pastizal, seguido por el bofedal, th'olar y pajonal.

El mayor sumidero de carbono resulta ser el bofedal con la sumatoria de captura de carbono en biomasa y suelo de 567 t C/ha, muy por encima del pastizal 238 t C/ha. Las características del pastizal son favorables para la vegetación, pero no así para la captura de carbono en el suelo. Aunque se ha demostrado que el pastizal tiene alto potencial por la actividad fotosintética de las especies que lo componen, el bofedal logra un valor alto en carbono capturado en el suelo y también demuestra un buen desarrollo fotosintético de su vegetación. De acuerdo a los resultados de este estudio el bofedal comprende un área de captura de carbono muy importante; sin embargo, los ecosistemas th'olar y pajonal también han demostrado su contribución a la mitigación del cambio climático.

Por la estrecha relación entre estos ecosistemas y el clima, el cambio climático podría tener impactos negativos sobre las praderas nativas y en consecuencia a la productividad agrícola. Los cambios extremos en las temperaturas, patrones de precipitación y eventos climáticos extremos, afectarían negativamente en la alteración de la disponibilidad y calidad de los alimentos. Por lo tanto, es de gran importancia conocer bajo estudios parecidos a este, el estrés sobre las plantas, y de esta manera plantear proyectos estratégicos para responder a estas condiciones adversas, esto se convertirá en una herramienta clave de resiliencia climática

y sostenibilidad. La clave de la conservación es el conocimiento; uno ama, cuida y protege aquello que conoce y del cual conoce su potencial.

9. RECOMENDACIONES

Es importante implementar programas adecuados de manejo de praderas nativas para reducir el impacto del cambio climático. Esto permite indicar que existe la necesidad de capacitación en la zona de intervención para un adecuado uso de recurso suelo, la conservación de especies de estas praderas para controlar de manera eficiente el cambio climático en la región, con lo que también se asegura la conservación de áreas de generación de recursos económicos, paisajísticos y medioambientales.

Se recomienda hacer estudios sobre el comportamiento del carbono del suelo a mayores profundidades que los 50 cm en bofedales y describir el comportamiento de los mismos, siendo que la profundidad de las raíces supera los 50 cm en algunos bofedales, y podrían significar mayor potencial. Por otro lado, los ecosistemas distintos del bofedal a mayor profundidad suelen tener estructura gravosa lo cual dificulta la capacidad de reserva de carbono.

Realizar este tipo de estudios en especies cultivadas es recomendable, para plantear posibles cambios en el futuro, además de la capacidad de estas de adaptarse, dado que estudios mencionan que no poseen el mismo grado de adaptabilidad que las especies nativas, es importante reflejarlos en estudios científicos.

Es recomendable también, realizar el estudio a lo largo del día en cualquier ecosistema que vaya a ser estudiado, dado que el comportamiento de los factores climáticos podría ser realmente influyente, si durante el día las variaciones fueran demasiado bruscas. También se recomienda realizar el estudio sobre especies anuales las cuales también tienen su aporte en esta absorción de carbono. Por lo anterior es deducible que las condiciones ambientales (temperatura, humedad, precipitación y radiación solar) in situ o in vivo afectan directamente a los registros de datos de F_t y Q_y ; esto permite conocer de manera indirecta la capacidad de secuestro de carbono en ecosistemas de pradera nativa del altiplano boliviano.

En este estudio se consideró la época de transición de agosto a diciembre, para un amplio estudio se recomienda realizar un estudio que complete el ciclo hidrológico y se podrá

inferir el nivel de capacidad de las plantas de adaptarse o reaccionar al cambio climático o a escenarios adversos. También se recomienda realizar un estudio evidenciando los futuros cambios debido al cambio climático incluyendo el aumento de CO₂, para estudiar el comportamiento de las diferentes especies frente a las mismas, ya que dentro de este estudio no se manipulo ningún factor climático. Es importante para revelar la respuesta de las plantas a estas condiciones, sean favorables o desfavorables y de la capacidad de las mismas para adecuarse a su entorno.



10. REFERENCIAS

Acosta, Y., & Paoloni, J. (2006). Dinámica de la Biomasa Microbiana en un suelo de la Península de Paraguaná Tratado con Residuos Orgánicos. Universidad de Zulia.

AGS Analítica S.A. (2023). agsanalitica. Obtenido de <https://www.agsanalitica.com/como-medir-fluorescencia#:~:text=Como%20la%20fluorescencia%20es%20directamente,absorbancia%20adem%C3%A1s%20de%20la%20fluorescencia>.

Alegria, W. (2016). *Texto Basico Para Profesional en ingenieria forestal en el area de fisiologia vegetal*. Iquitos, Perú.

<https://www.unapiquitos.edu.pe/pregrado/facultades/forestales/descargas/publicaciones/FISIO-TEX.pdf>

Alzerraca, H. (1987). Recursos forrajeros nativos y la desertificación en tierras altas de Bolivia.

Alzerraca, H. (1992). Producción y utilización de los pastizales de la zona Altoandina de Bolivia. reunion Nacional de raderas Nativas CORDEOR.

Alzérreca. (2001). Estudio de la capacidad de carga en Bofedales para la cría dealpacas en el sistema T.D.P.S. La Paz, Bolivia.

Analítica, A. (2002). *que es la fluorescencia*. ¿Para qué sirve un Espectrofluorómetro?: <https://www.agsanalitica.com/que-es-la-fluorescencia>

Azcón, J., & Talón, M. (2013). Fundamentos de Fisiología Vegetal. En M. Hipólito, G. Jeroni, & J. Flexas, *Fotorrespiración y mecanismos de conebración del dióxido de carbono* (pág. 244). Barcelona: McGraw-Hill.

Barrantes, O. (2000). Efectos del Dióxido de Azufre y del Ozono en *Pinus halepensi* Mill. en cámaras abiertas (Open-top Chambers). *Tesis doctoral*. Univertat Autònoma de Barcelona, Bellaterra.

Benavides, H. O., & León, G. E. (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

Brookes, P., Landman, A., Pruden, G., & DS, J. (1985). Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen; a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*.

Caballero, A. (2012). Comportamiento del nitrógeno y biomasa microbiana en suelos con diferente manejo, en la localidad de Villa Patarani (Altiplano Central). Universidad Mayor de San Andrés, La Paz.

Callejas, R., Kania, E., Contreras, A., Cecilia, P., & Morales, L. (s.f.). Evaluación de un método no destructivo para estimar las concentraciones de clorofila en hojas de variedades de uva de mesa. Universidad de Chile, Santiago.

Carreira, D. (2014). Carbono Orgánico (Método de Walkley & Black). Rosario, Argentina. https://doi.org/https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-cox__microescala.pdf

Carvajal, M., Mota, C., Alcaraz, C., Iglesias, M., & Martínez, M. (2014). Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos. Murcia, España.

Casierra, F., Ávila, O. F., & Riascos, D. H. (2012). Cambios diarios del contenido de pigmentos fotosintéticos en hojas de caléndula bajo sol y sombra. *Temas Agrarios*, 17(1), 60-71.

Castro, M. (15 de abril de 2020). *Pastizal: características, tipos, relieve, flora, clima, fauna*. Retrieved febrero de 2023, from Liferder: <https://www.liferder.com/pastizal/>

Ccoropuna, T., Villasante, J., Pauca, G., Quispe, J., & Luque, C. (2021). Cálculo y valoración del almacenamiento de carbono del humedal altoandino de Chalhuanca, Arequipa (Perú). *Revista de Investigaciones Altoandinas*.

Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a través de biomasa. *Cuadernos económicos de ICE*.

Change), I. (. (2003). *Cambio Climático*. Tokio.

Coppock, D. L., & Corinne, V. (Edits.). (2001). *Agropastoralismo Sostenible en el Altiplano Boliviano: El Caso de San José Llanga*. Universidad del Estado de Utah.

Cruz, D., & Huaycho, H. (2018). *Uso Sostenible de Tolares como Medida de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático en Comuniades AltoAndinas del Departamento de La Paz*. La Paz: Facultad de Agronomía.

D'atri, P. (2007). *Pastizales del mundo. Novedades de Biodiversidad en América Latina N° 160*. Argentina: (Inter Press Service) e IFEJ (Federación Internacional de Periodistas Ambientales) .

Delgadillo, I., Montenegro, L., Gabriel, P., & Luz, M. (2016). *Acta Biologica Colombiana. Medición de la Fluorescencia de la clorofila a en algas encapsuladas en alginato de calcio*. Universidad Nacional de Colombia, Bogota, Colombia.

Diaz, R. (2001). *Siembra Directa para la Conservación de Suelo en el Cono Sur*. Uruguay.

EEA. (2015). *El suelo y el cambio climático*.
<https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2015/articulos/el-suelo-y-el-cambio-climatico>

Evans, T., Mata, R., & Martin, D. (2013). *Growth, water productivity, and biomass allocation of Great Basin plants as affected by summer watering*.

Eyherabide, R., Sainz Rosas, H., Barberi, P., & Echavarría, H. (2014). *Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo*. B.As: Asociacion Argentina Ciencia del Suelo.

FAO. (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*.
<http://www.fao.org/3/bl001s/bl001s.pdf>

FAO. (2017). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Roma, Italia.

Flores, L. (2010). *Manual de Procedimientos Físicos de Laboratorio de suelos*. Magdalena.

Flores, M. (2017). “Captura de dióxido de carbono (CO₂) en la “Chillillua” (Festuca dolichophylla Presl) de los Pastizales del CIP Illpa-Puno. *Tesis*. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.

García, M., Yujra, E., Taboada, C., Butrón, C., Guilles, J., & Rojas, K. (2014). Uso y validez de indicadores climáticos locales como herramientas de pronósticos adaptados a la realidad Andina. (R. d. Naturales, Ed.) La Paz, Bolivia.

Genin, A., & Alzerreca, H. (1995). Reseña de la Vegetación de la Zona deTurco. En Waira Pampa, un Sistema Pastoril Camélidos- Ovinos delAltiplano Árido Bolivia.

Gonzales, S., Perales Vela, H., & Salcedo Alvarez, M. (2008). La Fluorescencia de la Clorofila a como Herramienta en la Investigación de Efectos Tóxicos en el Aparato Fotosintético de las Plantas y Algas. *Revista de Educaión Bioquímica*, 119.

Goretti, M. L. (2021). Evaluación de la aptitud de uso de la tierra en la subcuenca del río Huanquisco del municipio de Ancoraimes. *Proyecto de grado*. Universidad Mayor de San Andres, La Paz, Bolivia.

Gutiérrez, F., Gonzales, J., Ramírez, K., Mercado, M., & Arrázola, S. (2013). *Guía ilustrada de especies forrajeras nativas de la zona andina en Bolivia*. Cochabamba, Bolivia.

Hernandez, J. (2013). *Edafología y Fertilidad. Colombia*. Colombia: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

Hernández, M. E. (2010). Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Terra Latinoamericana*. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792010000200005

Hernandez, R., Fernandez, C., & Baptista, P. (2010). *Metodología de la Investigación*. Mc GrawHill.

Hilari, V. (2010). Identificación y análisis multitemporal de ciatro bofedales en el Altiplano norte del departamento de La Paz. Agronomía UMSA: Tesis licenciatura.

Houghton, R. (1995). Changes in the storage of terrestrial carbon since 1850 0, In: (eds). *Soils and Global Change*. Florida, EEUU: CRC & Lewis Publisher.

Huallpa, M. (2019). Captura de carbono (CO₂) en dos especies de “Tola” (*Parastrephia lepidophylla* Wedd) y (*Baccharis incarum* Wedd) en el sector Llusta distrito de Mazocruz – Puno. *Tesis*. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.

Hurtado, I., & Toro, J. (1998). *Paradigmas y Métodos de Investigación en tiempos de cambio*. Venezuela: Episteme Consultores Asociados.

Instruments, P. S. (2021). FluorPen FP 110 PAR-FluorPen FP 110 Monitoring Pen MP 100.

INTA. (31 de 5 de 2010). Carbono orgánico del suelo por Walkey y Black evaluacion de dos escals de trabajo. Rosario, Argentina. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-cox__microescala.pdf

IPCC. (2014). Cambio climático 2014 Informe de síntesis resumen para responsables de políticas. IPCC.

Jimenez, S., Alvarado, O. & Balaguera, H. (2015). Fluorescencia como indicador de estrés en *Helianthus annuus* L. Una revisión. *Revista Colombiana de ciencias hortícolas*, 9.

Kanninen, M. (2003). Secuestro de Carbono en bosques, su papel en el ciclo global. CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Kerlinger, E. N. (1998). *Investigación del comprotamiento: Técnicas y métodos*. México: Nueva Editorial Interamericana.

León, A. Y. (2016). Reserva de carbono en bofedales y su relación con la florística y condición del Pastizal. *Tesis de maestria*. Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú.

López, E. (2015). Periodo de Corte y su influencia sobre la producción de biomasa, eficiencia fotosintética y captura de carbono del pasto *Pennisetum merkeron* en Zungarococha. *Tesis*. Universida Nacional de la Amazonia Peruana, Iquitos, Perú.

Loza, S., Meneses, R., & Anthelme, F. (2015). Cominidades vegetales de los bofeales de la Cordillera Real (Bolivia) bajo calentamiento global. *Ecología en Bolivia*.

Manrique, E. (2003). Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz para la fotosíntesis. *Ecosistemas*, XII(1), 1-11.

Manrique, L., & Bartholomew, D. (1991). Growth and yield performance of potato grown at three elevations in Hawaii.

Maquera, D. (2017). Determinación del contenido de carbono por especie forestal en el bosque del CIP Camacani - UNA- Puno por titulación. *Tesis de Grado*. Universidad Nacional del Altiplano, Puno.

Martínez, A., & Leyva, A. (2014). La Biomasa de los cultivos en el agroecosistema y sus beneficios agroecológicos. *Ministerio de Educación Superior. Cuba*.

Martínez, J. F., Olmos, G., Palacio, J., & Ruiz, V. M. (2013). Estimación del carbono orgánico en suelos de zonas áridas y semiáridas. En F. Paz, J. Wong, M. Bazan, & V. Saynes (Edits.), *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2013*. Estado de México, México.

Maxwell, K., & Johnson, G. (2000). *Chlorophyll fluorescence. A practical guide*. J. Exp Bot.

Mayta, F. (2016). Efectos del cambio climático en el Altiplano boliviano. *Centro de Investigación y Promoción del Campesinado*.

Medina, C., & Medina, Y. (2020). Valoración económica del secuestro y almacenamiento de carbono en la pino seca del suroeste del Perú. Puno.

Medrano, H., Gamés, J., & Flexas, J. (2013). Fotorrespiración y mecanismos de concentración del dióxido de Carbono. En J. Azcón-Bieto, & M. Talón, *Fundamentos de Fisiología Vegetal* (pág. 227). Barcelona: McGraw-Hill.

Medrano, R., Chupan, L., & Vila, M. (2012). Almacenamiento de carbono en especies predominantes de flora en el lago Chinchaycocha.

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 de Bolivia*.

Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2018). *Programa de establecimiento de Metas de Neutralidad de la Degradación de Tierras*. Retrieved 08 de 05 de 2021, from https://knowledge.unccd.int/sites/default/files/ldn_targets/2018-11/Bolivia%20LDN%20TSP%20Country%20Report.pdf

Miranda, G., Campero, S., & Chura, O. (2015). Caracterización del clima del valle de la ciudad de La Paz. En M. I. Moya, R. I. Meneses, & J. Sarmiento (Edits.), *Historia Natural de un Valle en Los Andes* (Tercera ed., pág. 400). La Paz, Bolivia: Museo Nacional de Historia Natural.

Miranda, R., & Caballero, A. (2015). Metodo y analisis de Suelo. *Metodo de Analisis y Suelo*. Facultad de Agronomía-UMSA, La Paz, Bolivia.

Molina, E. y Meléndez, G. (2002). Tabla de interpretación de análisis de suelos. Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. Mimeo.

Moreno, J. (2007). *Compostaje*. Mundi Prensa.

Moreno, S., Perales, H., & Salcedo, M. (2008). La fluorescencia de la clorofila a como herramienta en la investigación de efectos tóxicos en el aparato fotosintético de plantas y algas. *Revista de Educación Bioquímica Universidad Nacional Autónoma de México*, 119.

Moya, M. I., Meneses, R. I., & Sarmiento, J. (Edits.). (2017). *Historia natural del valle de La Paz*. (Tercera ed.). La Paz, Bolivia: Museo Nacional de Historia Natural.

Neuhauser, C. (2004). *Matemáticas para las Ciencias*.

Omote, R. (2022). Relación de la profundidad del suelo con el contenido de carbono orgánico en tres bofedales altoandinos de la microcuenca Apacheta. Ayacucho 2016. *Tesis de grado*. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga , Ayacucho, Perú.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Ortuño, T., & Sarmiento, L. (2006). Dinámica sucesional de la vegetación en un sistema agrícola con descanso largo en el Altiplano central boliviano. *Ecología en Bolivia*.

Pacheco, M. (1998). . Aprovechamiento de Áreas Hidromórficas en el Altiplano Peruano-Boliviano. Manejo de Bofedales. Cría de Alpacas. La Paz, Corporación Andina de Fomento y Autoridad Bi-Nacional del Lago Titicaca (ALT). La Paz.

Padilla, V., & Ticona, D. (Edits.). (2018). Conservación y uso sostenible de tolares como medida de mitigación y adaptación al cambio climático en comunidades altoandinas del departamento de La Paz. PIA-ACC-56. Universidad Mayor de San Andrés - Facultad de agronomía. La Paz, Bolivia.

Pari, R. (2021). Evaluación del Contenido de Carbono Orgánico del suelo en la región andina de Bolivia. *Trabajo Dirigido*. Universidad Mayor de San Andres, La Paz.

Parra, A. (2023). QuestionPro. Obtenido de <https://www.questionpro.com/blog/es/coeficiente-de-correlacion-de-spearman>.

Paz, O., & Gonzales, J. (2007). Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en Bolivia. La Paz.

Photon Systems Instruments. (2021). FluorPen FP 110 PAR FluorPen FP 110 Monitoring Pen MP 100 Manual and User Guide. Drázov, Czech Republic. Retrieved 2022.

PNUD. (2002). Manual de manejo y uso sostenido de la thola y los tholares. La Paz.

Podwojeski, P., & Poulenard, J. (2000). *Los Suelos de los Páramos del Ecuador*. Yala.

Ponce, R. (2018). Cuantificación de Carbono almacenado en la biomasa de los Tólares como medida de mitigación al cambio climático, en los municipios de Patacamaya y Sica Sica. *Tesis de Grado*. Universidad Mayor de San Andres, La Paz, Bolivia.

Quispe, D. (2019). Sistematización de trabajos de investigación sobre praderas nativas de la facultad de agronomía, de la Universidad Mayor de San Andres (periodo 2001 a 2017). *Trabajo dirigido*. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz.

Quito, K. (02 de 2018). Evaluación del volumen de captura de carbono en la chakra andina en tres pisos altitudinales en la parroquia San Miguel de Porotos, provincia del Cañar y su aporte al efecto invernadero. *Tesis de Pregrado*. Universidad Politecnica Salesiana, Quito, Ecuador.

Ramos, A. (2011). Caracterizar el manejo y uso de bofedales dentro del Área Natural de Manejo Integrado Nacional Apolobamba. *Tesis de grado*. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.

Ramos, E., & Zúñiga, D. (2007). Efecto de la humedad, Temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel laboratorio. Lima, Perú.

Reyes O, J. (2011). Evaluación agrstológica y manejo tradicional de forma participativa de los CANAPAS altoandians municipio de Batallas provincia Los Andes La Paz (tesis de grado).

Rivas, J. (2013). Utilización de la energía luminosa en la fotosíntesis. En J. Azcon-Bieto , & M. Talón, *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Barelona: McGraw-Hill Interamericana de España.

Romero, I. (2012). Análisis de la dinámica hídrica de plantas tipo C3. *tesis*.

Saugier, B., & Pontailer, J. Y. (2006). El ciclo global del carbono y sus consecuencias en la fotosíntesis en el Altiplano boliviano. *Ecología en Bolivia*. La Paz.

Secretaria de Energía. (2008). *Energías Renovables 2008 - Energía Biomasa*. C. F., Argentina.

http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf

Shaxson, F., & Barber, R. (2005). Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal El significado de la porosidad del suelo. *Boletín de suelos de la FAO 79*. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación, Roma, Italia.

Steel, R., & Torrie, J. (1960). Principios y Procesos Esrtadiáticos.

bofedales de altura en la cuenca Katari.

Suarez, D., Acurio, C., Chimbolema, S., & Aguirre, X. (2016). Análisis del carbono secuestrado en humedales Altoandinos de dos áreas protegidas de Ecuador. *Universidad Tecnológica Equinoccial*.

Surco, D. (2022). Caracterización de la vegetación arbórea con potencial de captura de carbono en el bosque de la comunidad nativa tres islas, Tambopata-Madre de Dios. *Tesis de grado*. Universidad Nacional Amazonica de Madre de Dios, Puerto Maldonado, Perú.

Taboada, C., García, M., Cuiza, A., Pozo, O., Yucra, E., & Gilles, J. (2014). Estructuración económica de sistemas productivos agrícolas en respuesta a la variabilidad climática en los Andes Boliviano. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 1(1). http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2409-16182014000100004

Tapia, M., & Flores, O. (1984). Pastoreo y pastizales de los Andes del Sur del Perú. . lima.

Universidad Nacional de Córdoba. (s/f). Detrminación del Contenido Hídrico del Suelo. En D. d. Vegetal, *Cátedra de Cereales y Oleaginosas*. Córdoba.

Vázquez, C., & de Torres, J. (2005). Ensayos de variedades y tecnicas de cultivo. *Revision Bibliografica y puesta a punto de metodos de valoracion de la actividad biologica del suelo*. Escuela Universitaria de Ingenieria Tecnica Agricola INEA, Valladolid, España.

Valenzuela,I., & Visconti, E. (2020). Influencia de clima, uso del suelo y profundidad sobre el contenido de carbono orgánico de dos piso altitudinales andinos del departamento Norte de Santander, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*.

Vela, G., López, J., & Rodriguez, M. d. (2011) Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones geográficas*, (77), 18-30. Recuperado en 29 de diciembre de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112012000100003&lng=es&tlng=es.

Wan, C., Sosebe, & McMichaelb, L. (2016). Broom snakeweed responses to drought: II. Root growth, carbon allocation, and mortality.

Yupanqui, J. (2012). Determinacion de Clorofila A, y ensayos fisicoquimicos en aguas del lago titicaca. *Tesis de Grado*. Universidad Mayor de San Andres, La Paz.

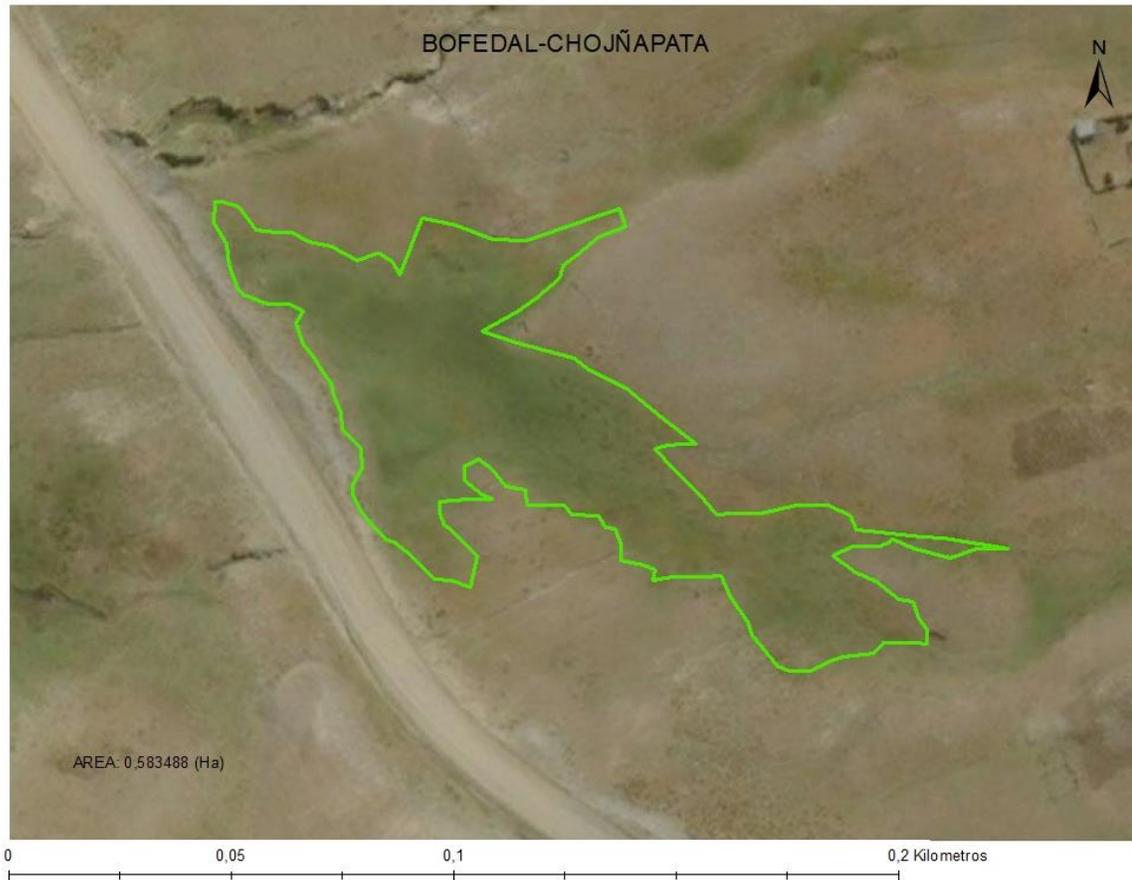
<https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/18059/M-231.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Zapana, J. (2019). Evaluación de Pastizales Naturales y determinacion de la carga animalm actual en la comindad de Chila, Puno. Universidad Nacional del Altiplano.

11. ANEXOS

Anexo A

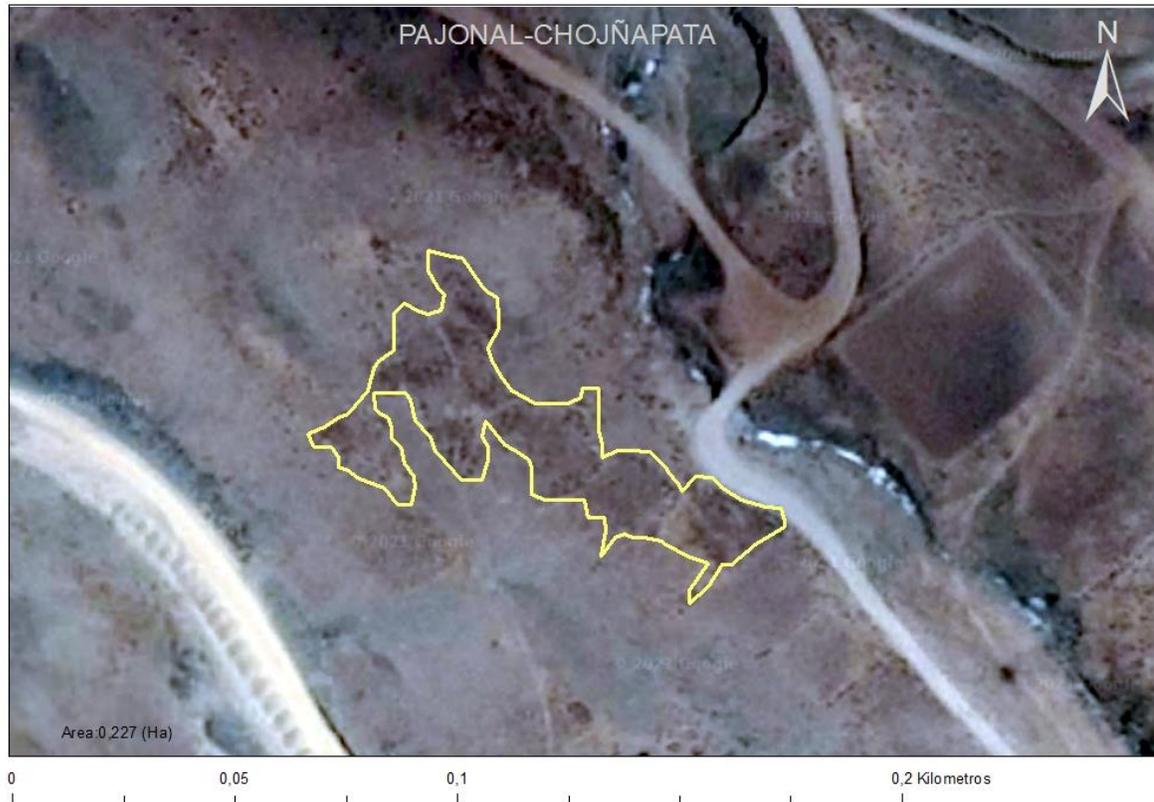
Imagen satelital - Ecosistema bofedal



Fuente. Google Earth

Anexo B

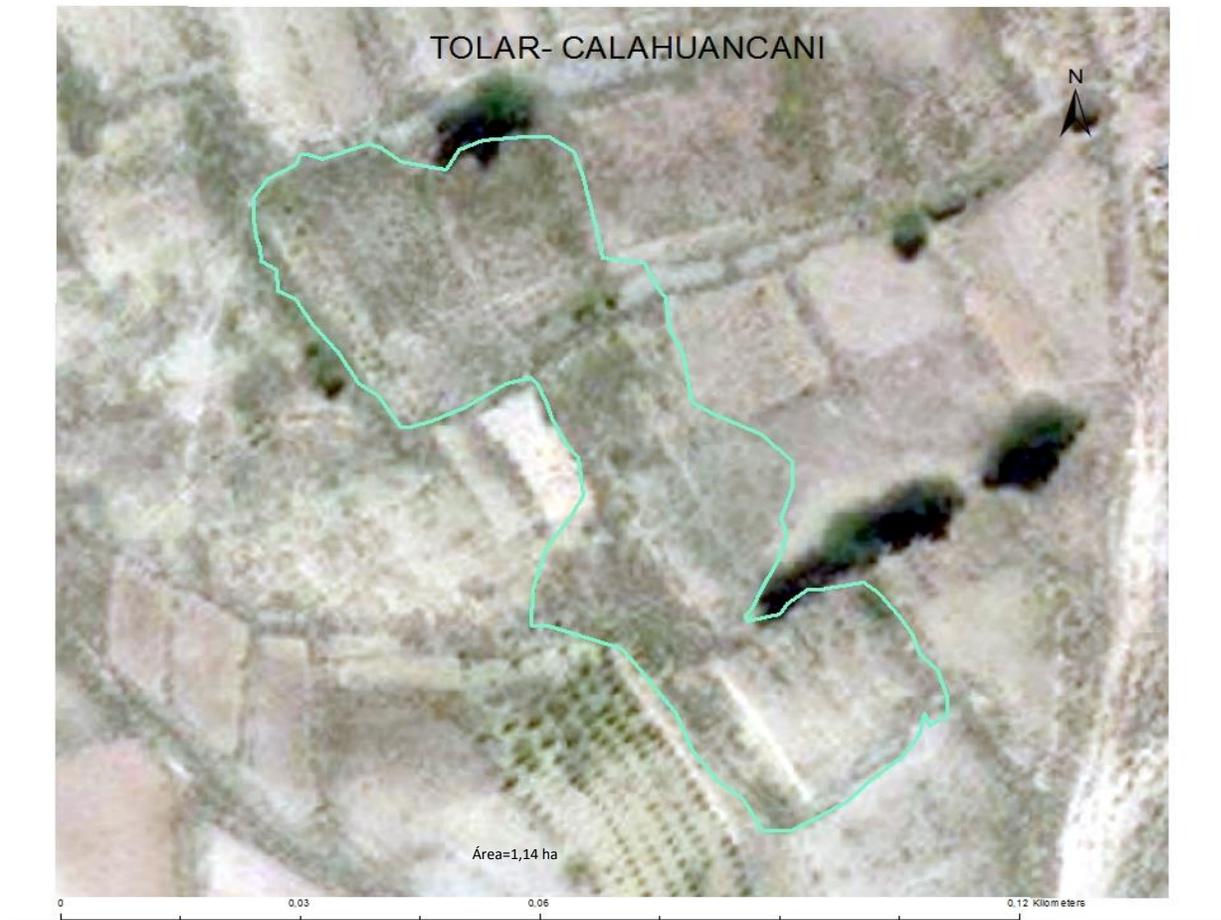
Imagen satelital - Ecosistema pajonal



Fuente. Google Earth

Anexo C

Imagen satelital - Ecosistema th'olar



Fuente. Google Earth

Anexo D

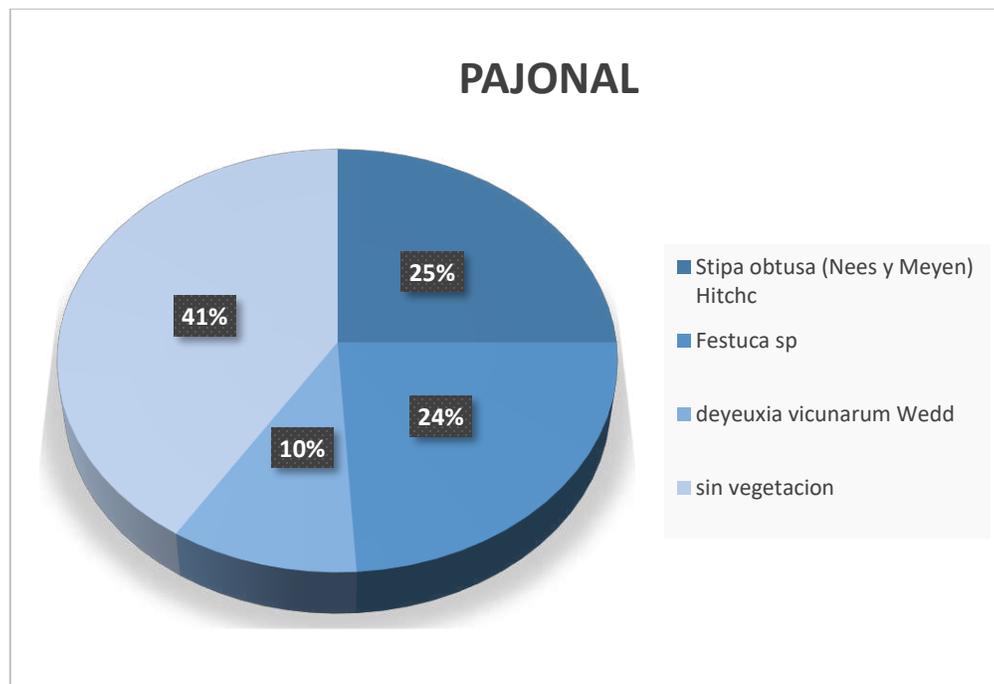
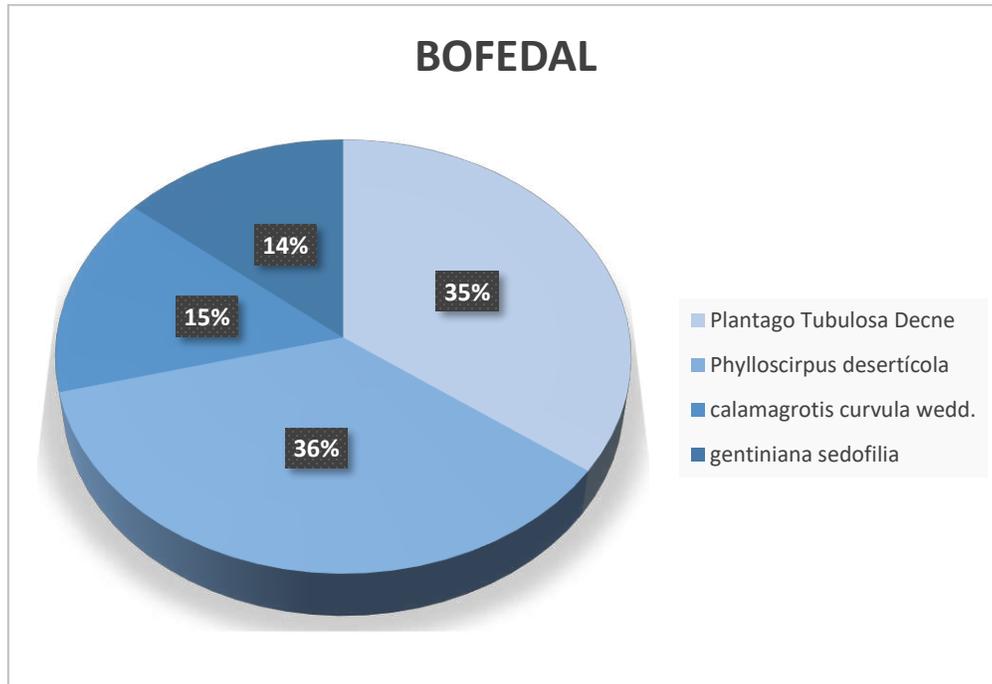
Imagen satelital - Ecosistema pastizal

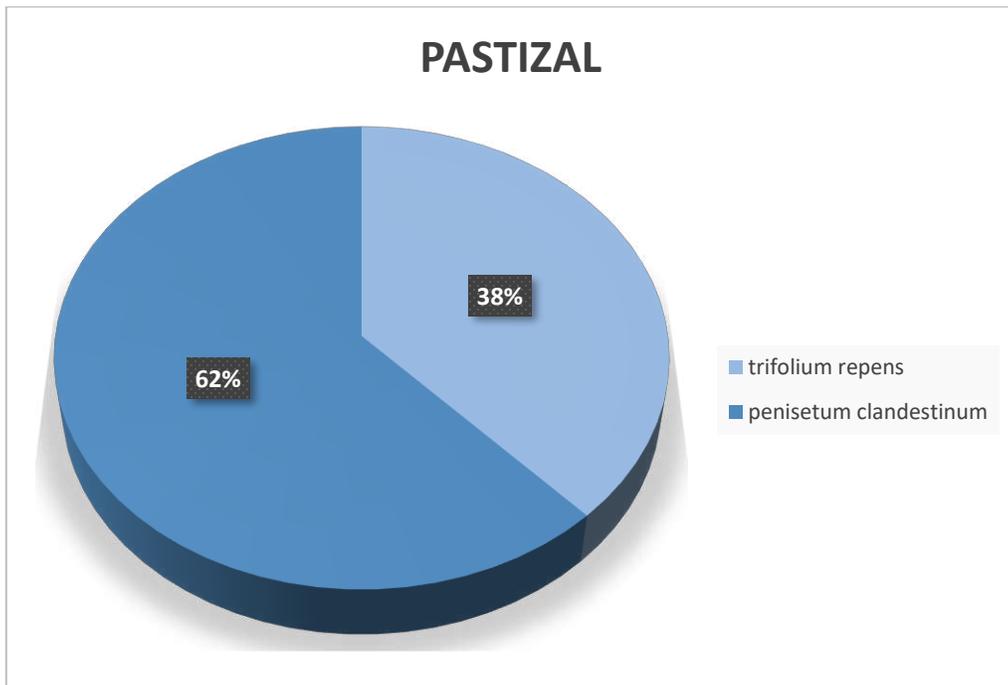
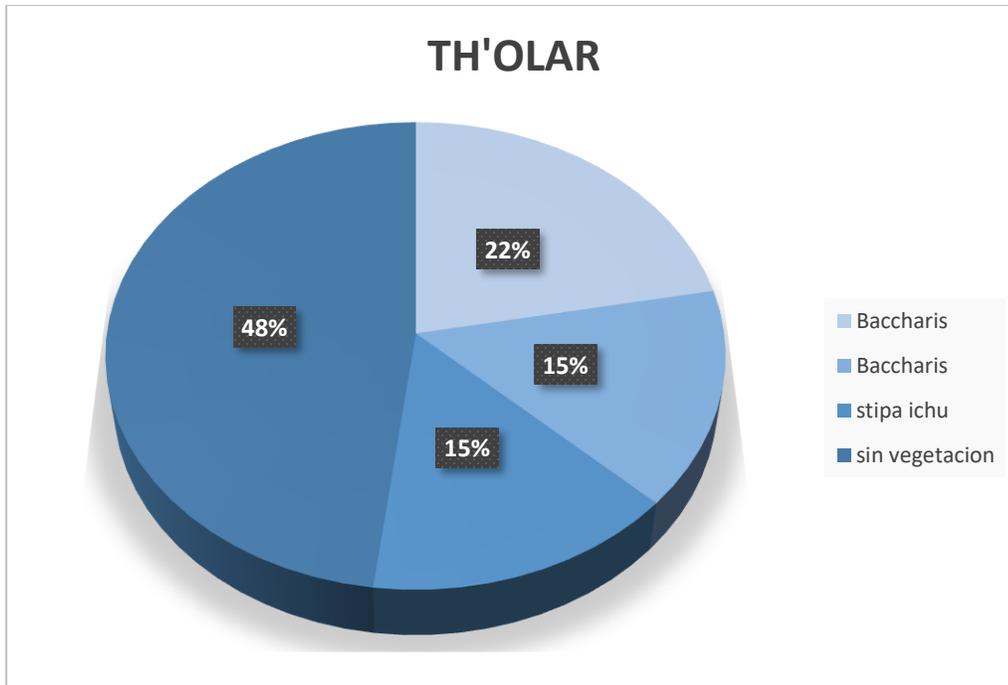


Fuente. Google Earth

Anexo E

Gráfico de porcentaje de especies registradas por ecosistema





Anexo F

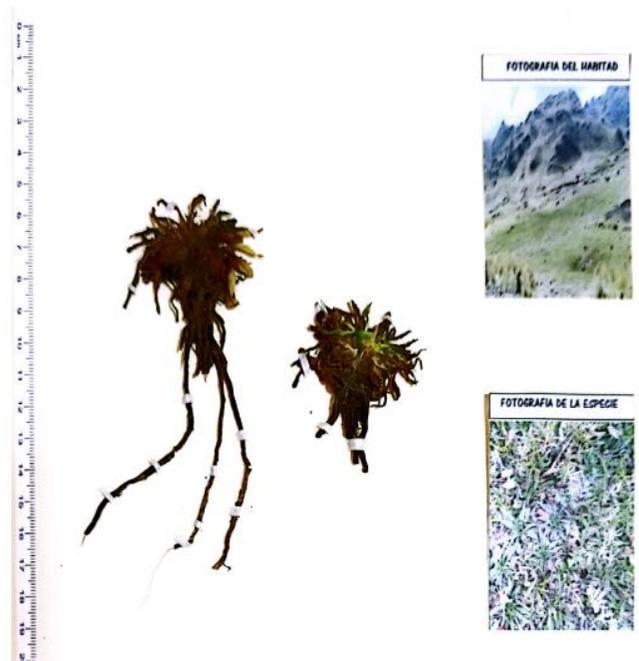
Especies de ecosistema bofedal: Localidad Chojñapata

Nro especie 1

Georeferenciación: -15,78688833 -68,87707500

Elevación: 4299 m.s.n.m.

Fecha 11/08/2021

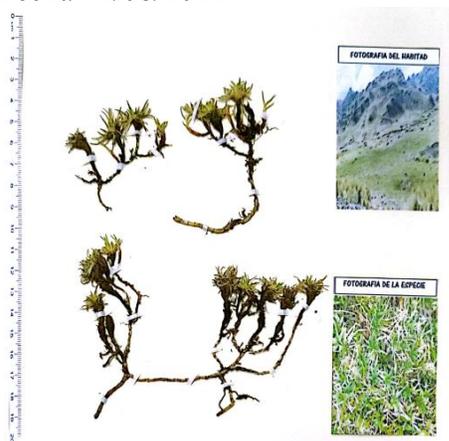
**Morfo especie/ especie 1**

Especie	Plantago tubulosa Decne
Familia	Plantaginaceae
Genero	Plantago
Nombre común	Wiru wiru Cojines
Formas de vida	
Fenología	Florece durante agosto a octubre.
Duración del ciclo biológico	Perenne
Morfología	Hierva pigmea, formando cojines planos y duros, con rizomas cortos y numerosas raíces adventicias. Hojas en roseta basal, lanceoladas, dentadas, glabras con tricomas escasos. Flores unisexuales, escondidas entre las hojas, viéndose solo las anteras y el estilo. Fruto: pixidio maduro elevado por un carpoforo.
Distribución y superficie (hábitat)	3600 a 4500 msnm, en bofedales, junto a riachuelos, en la puna húmeda y yungas
Usos	Forrajera para ganado ovino, vacuno y camélido

Fuente: Gutiérrez, Gonzales, Ramírez, Mercado, & Arrázola (2013) Guía ilustrada de especies forrajeras nativas de la zona andina en Bolivia.

Nro especie 2

Sitio/ Localidad: Chojñapata
 Georeferenciación: -15,78688833 -68,87707500
 Elevación: 4299 m.s.n.m.
 Fecha 11/08/2021

**Morfo especie/ especie 2**

Especie	Phylloscirpus deserticola
Familia	Cyperaceae
Genero	Phylloscirpus
Nombre común	Qochi Chiji, Ch'iñi Qochi (aymara) (Pestalozzi 1998).
Formas de vida	Rosetas
Fenología	Florece el año redondo, pero en el valle de La Paz se han encontrado individuos en estado fértil entre agosto y noviembre.
Duración del ciclo biológico	Perenne
Morfología	Es una pequeña hierba en roseta, con forma de estrella, puede crecer formando placas o pequeños cojines abombados, ya que al igual que las juncáceas posee una forma de crecimiento que le faculta a producir un poco de turba; su habilidad para prosperar en ambientes secos le confiere una característica que puede ser usada para identificar bofedales en proceso de desecación. Sus hojas son de color verde plumizo, y su inflorescencia apical, simple y con una o varias espiguillas, son características taxonómicas del género. El fruto es un aquenio con ápice agudo y pelos cortos como cerdas, y posee remanentes del estilo en la base.
Distribución y superficie (hábitat)	2000 a 4800 msnm, bofedales
usos	forrajera para ganado ovino, vacuno y camélido

Fuente: Gutiérrez, Gonzales, Ramírez, Mercado, & Arrázola (2013) Guía ilustrada de especies forrajeras nativas de la zona andina en Bolivia.

Nro especie 3

Sitio/ Localidad: Chojñapata
 Georeferenciación: -15,78688833 -68,87707500
 Elevación: 4299 m.s.n.m.
 Fecha 11/08/2021

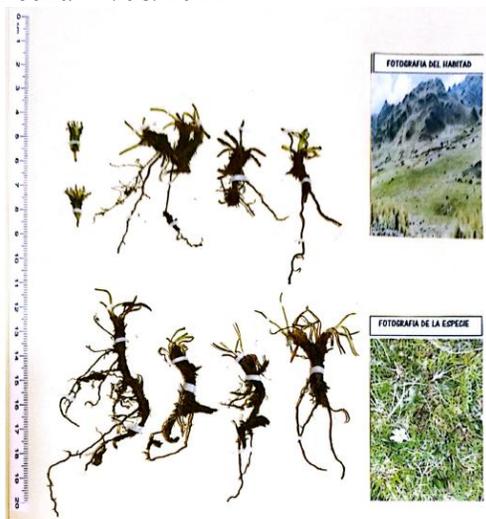
**Morfo especie/ especie 3**

Especie	Calamagrostis curvula (Wedd) Pilger
Familia	Poaceae
Genero	Calamagrostis
Nombre común	crepillo; parki
Formas de vida	Macollas
Fenología	espigas en febrero.
Duración del ciclo biológico	Perenne
Morfología	Plantas perennes, cespitosas, con finos rizomas verticales. Las hojas forman un césped basal de 5 - 9 cm de largo. Cañas de 4 - 30 cm de altura, glabras, generalmente tenues, exertas. Panícula especiforme; linear de 1-3 cm de largo. Las espiguillas solitarias. espiguillas fértiles pediceladas (glabros). glumas mayores que el antecio. lemma con arista de 1,6 - 3,8 mm de largo, menor que la lemma o las glumas.
Distribución y superficie (hábitat)	3500 a 5000 msnm, en pajonales con suelos húmedos y bofedales, tanto en la puna húmeda como en la puna seca.
Usos	forrajera para ganado camélido. Buena palatabilidad en época húmeda; una vez seca pierde su calidad.

Fuente: Gutiérrez, Gonzales, Ramírez, Mercado, & Arrázola (2013) Guía ilustrada de especies forrajeras nativas de la zona andina en Bolivia.

Nro especie 4

Sitio/ Localidad: Chojñapata
 Georeferenciación: -15,78688833 -68,87707500
 Elevación: 4299 m.s.n.m.
 Fecha 11/08/2021

**Morfo especie/ especie 4**

Especie	Gentiana sedofilia
Familia	Gentianaceae
Genero	Gentiana
Nombre común	P'enqa p'enqa
Formas de vida	Crece en conjunto con otras especies formando almohadillas.
Fenología	Florece durante enero a abril.
Duración del ciclo biológico	Perenne
Morfología	Hierva perenne de hasta 5 cm de alto. Raíz central rojiza. Hojas opuestas, estrecho-lanceoladas sedosas, mucronadas, margen hialino, finamente dentado. Flor abierta. Aproximadamente de 1 cm de diámetro de color azul celeste blanquecina, con ápice de los pétalos bipartidos. Glándulas nectaríferas en la base del ovario. Fruto cilíndrico, claro, de 1,5 cm de longitud. Semillas reticuladas, sin alas, de 8 mm de longitud.
Distribución y superficie (hábitat)	2900 a 4500 msnm, en lugares húmedos, cerca de poblaciones de <i>Festuca dolichophylla</i> (chilliguares) de la puna húmeda.
Usos	Forrajera para ganado ovino, vacuno y camélido.

Fuente: Gutiérrez, Gonzales, Ramírez, Mercado, & Arrázola (2013) Guía ilustrada de especies forrajeras nativas de la zona andina en Bolivia.

Anexo G

Especies de ecosistema pajonal Localidad Chojñapata

Nro especie 5

Sitio/ Localidad: Chojñapata

Georeferenciación: -15,78688833 -68,87707500

Elevación: 4266 m.s.n.m.

Fecha 11/08/2021

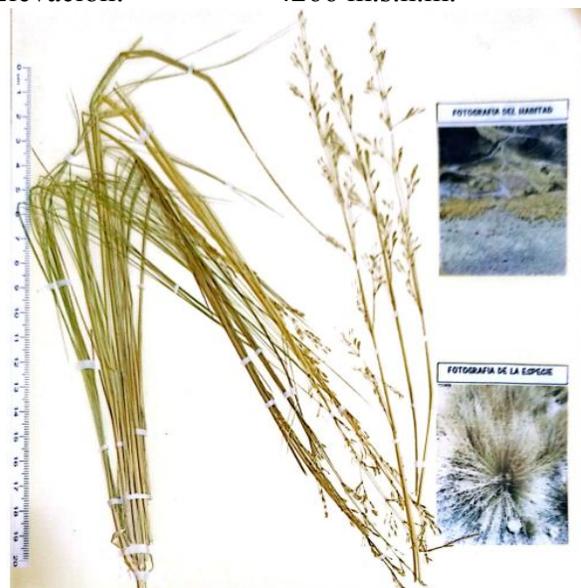
**Morfo especie/ especie 1**

Especie	<i>Stipa obtusa</i> (nees y meyen) hitchc
Familia	Poaceae
Genero	<i>Stipa</i>
Nombre común	Anu wichu; tisña; tisña Ichu
Formas de vida	Macollas
Fenología	Florece durante febrero a marzo
Duración del ciclo biológico	Perenne
Morfología	Plantas perennes, cespitosas con culmos de 20 - 60 cm de alto, con hojas principalmente basales. Laminas involutas, filiformes, rígidas, escabriuscula, de 15 -25 cm de largo, acuminadas. Panícula angostamente oblonga de 4 - 16 cm de largo, ramas cortas, divergentes o adpresas. cuerpo de la lemma glabro, ápice ciliado, antecio de 2,5 mm de largo. fruto: caripse. florece durante febrero a marzo.
Distribución y superficie (hábitat)	3500 a 4300 msnm, en pajonales y matorrales altomontanos y altoandinos subhúmedos a húmedos de la puna húmeda, también crece junto a <i>Stipa ichu</i> en lugares calientes
Usos	Forrajera, aunque en general poco palatable
Observaciones	Otros nombres: <i>Stipa boliviensis</i> hack

Fuente: Gutiérrez, Gonzales, Ramírez, Mercado, & Arrázola (2013) Guía ilustrada de especies forrajeras nativas de la zona andina en Bolivia.

Nro especie 6

Sitio/ Localidad: Chojñapata
 Georeferenciación: -15,78688833 -68,87707500
 Elevación: 4266 m.s.n.m.

**Morfo especie/ especie 2**

Especie	Festuca sp
Familia	Poaceae
Genero	festuca
Nombre común	
Formas de vida	Macollas
Duración del ciclo biológico	Perenne
Morfología	Plantas perennes, rizomatosas o cespitosas. Culmos simples, de 0,1-2 m de altura, con 1 o 2-6 nudos glabros; innovaciones extravaginales, intravaginales o mixtas. Vainas foliares abiertas o parcialmente cerradas, vainas basales de algunas especies formando bulbos, escamas (catáfilos) o desintegradas en fibras; aurículas presentes o ausentes; lígula membranácea a coriácea, menores de 1 mm long., excepcionalmente hasta 10 mm long.; láminas basales o caulinares, planas, conduplicadas o involutas, sin venas transversales, de 0,2-15 mm lat.; verdes, oliváceas o blanquecinas.
Distribución y superficie (hábitat)	2700 a 4700 msnm, en laderas secas y pedregosas, especie nativa de la puna seca, puna húmeda y valles secos. Pag 125 3.
Usos	forrajera par ganado vacuno, ovino y camelido

Fuente: Gutiérrez, Gonzales, Ramírez, Mercado, & Arrázola (2013) Guía ilustrada de especies forrajeras nativas de la zona andina en Bolivia.

Nro especie 7

Sitio/ Localidad: Chojñapata
 Georeferenciación: -15,78688833 -68,87707500
 Elevación: 4266 m.s.n.m.
 Fecha 11/08/2021

**Morfo especie/ especie 3**

Especie	<i>Deyeuxia vicunarum</i> Wedd
Familia	Poaceae
Genero	<i>Deyeuxia</i>
Nombre común	Crespillo
Formas de vida	Macollas
Fenología	Espigamiento durante febrero a marzo
Duración del ciclo biológico	Perenne
Morfología	Planta perenne cespitosa, forma matas pequeñas, densas, cañas floríferas de 4-40 cm de alto, numerosas, erguidas, glabras o levemente escabrosas. Hojas isomorfas, las hojas de la caña y aquellas de las innovaciones semejantes. Laminas convolutas, junciformes, rígidas, curvadas o flexuosas, apice agudo, punzante u obtuso a navicular. inflorescencias de 1 a 8 cm de largo y 0,3 a 1,0 cm de ancho subespiciformes, excertas o subincluidas en el césped. fruto: cariopside.
Distribución y superficie (hábitat)	3500 s 4900 msnm, común de los pajonales y matorrales, en praderas cortas algo húmedas y en parcelas en descanso. También crece en suelos rocosos y húmedos y alcanza el limite superior de la nieve. Especie nativa de la puna húmeda. pp 131 3.
Usos	forrajera par ganado vacuno, ovino y camélido

Fuente: Gutiérrez, Gonzales, Ramírez, Mercado, & Arrázola (2013) Guía ilustrada de especies forrajeras nativas de la zona andina en Bolivia.

Anexo H

Especies de ecosistema th'olar. Localidad Calahuancani

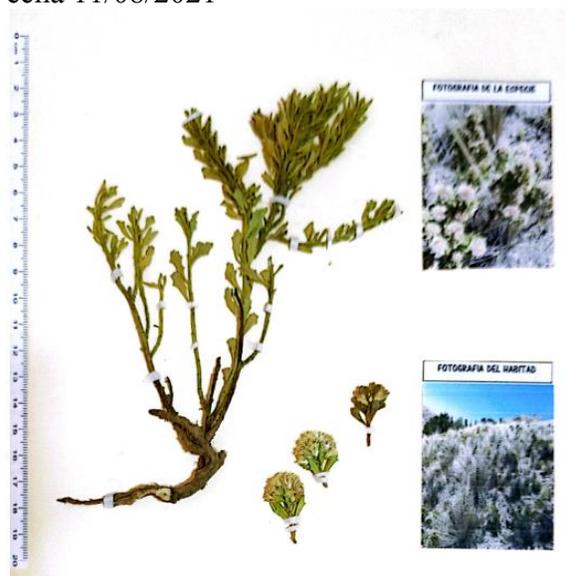
Nro especie 8

Sitio/ Localidad: Calahuancani

Georeferenciación: -15,85194833 -68,84143667

Elevación: 4112 m.s.n.m.

Fecha 11/08/2021

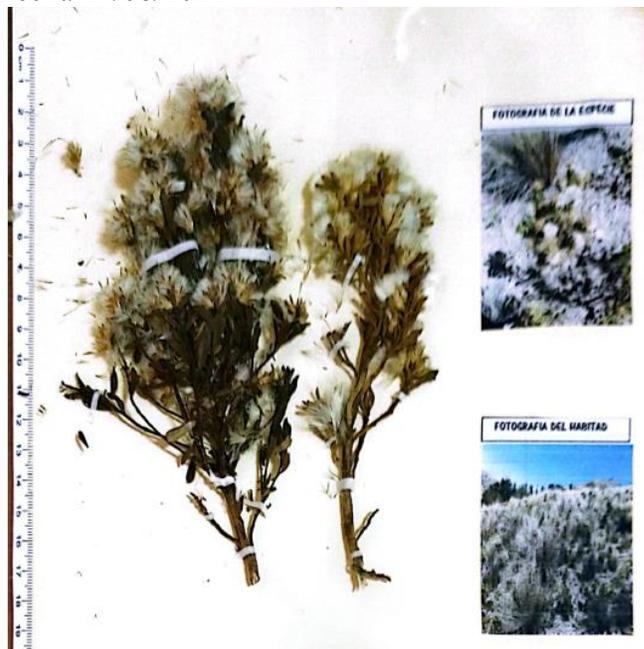
**Morfo especie/ especie 1**

Especie	Baccharis tola Phil
Familia	Asteraceae
Genero	Baccharis
Nombre común	ñack'a huara; ñack'a llant'a, th'ola
Formas de vida	Herbácea, arbustiva
Fenología	Florece de agosto a noviembre y con fructificación durante octubre a marzo
Duración del ciclo biológico	Perenne
Morfología	Arbusto perennifolio dioico, de hasta 1 m de alto, densamente ramificado desde la base; con hojas y tallos fuertemente resinosos. Hojas alternas, simples espatuladas, enteras o con uno o dos dientes en la parte apical. Flores unisexuales, capítulos numerosos, solitarios en el extremo de las ramitas, de 4 mm de diámetro. Frutos aquenios provistos de papus blanquecino.
Distribución y superficie (hábitat)	3300 a 4500 msnm, en suelos pedregosos, rocosos y arenosos; secos a medianamente húmedos. Crece tanto en la puna subhúmeda como en la semiárida de Perú y Bolivia y también ocasionalmente en algunos lugares del piso altoandino.
Usos	Forrajera para ganado ovino y camélido. Buena calidad de leña y medicinal.

Fuente: Gutiérrez, Gonzales, Ramírez, Mercado, & Arrázola (2013) Guía ilustrada de especies forrajeras nativas de la zona andina en Bolivia.

Nro especie 9

Sitio/ Localidad: Calahuancani
 Georeferenciación: -15,85194833 -68,84143667
 Elevación: 4112 m.s.n.m.
 Fecha 11/08/2021

**Morfo especie/ especie 2**

Especie	Braccharis tola var. Chrysophylla (F.H. Hellw.) Joch. Mull
Familia	Asteraceae
Genero	Baccharis
Nombre común	Ñaca Th'olar; Tholita
Formas de vida	Herbácea, arbustiva
Fenología	florece en la época húmeda
Duración del ciclo biológico	Perenne
Morfología	Arbusto enano dioco de 10 a 120 cm de altura. Hojas pequeñas, lamina de forma oblanceolada u obovada, ápice mayormente obtuso, margen entero con 1 o 2 dientes en cada lado. Flores blancas en capítulos con papus muy largos. Fruto aquenio.
Distribución y superficie (hábitat)	4100 a 4800 msnm, en pajonales secos y matorrales abiertos y bosque abierto de Polylepis de la puna húmeda.
Usos	Forrajera para ganado ovino y camélido.

Fuente: Gutiérrez, Gonzales, Ramírez, Mercado, & Arrázola (2013) Guía ilustrada de especies forrajeras nativas de la zona andina en Bolivia.

Nro especie 10

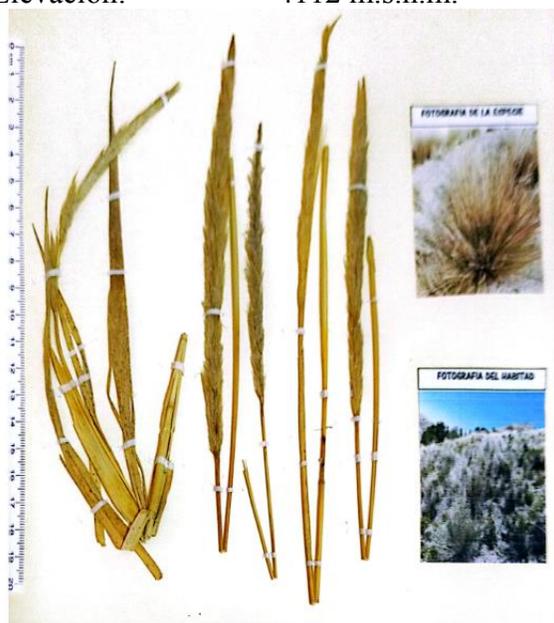
Los tomados a en fecha 11/08/2021

Sitio/ Localidad: Calahuancani

Georeferenciación: -15,85194833 -68,84143667

Tipo de ecosistema: T'olar

Elevación: 4112 m.s.n.m.

**Morfo especie/ especie 10**

Especie	<i>Stipa ichu</i> pp 164 3.
Familia	Poaceae
Genero	<i>Stipa</i>
Nombre común	ichu; paja dura; qeshua paja; sikuya wichu
Formas de vida	Macollas
Fenología	Espigas en agosto, frutos en mayo y diciembre.
Duración del ciclo biológico	Perenne
Morfología	Plantas perennes, cespitosas con culmos de 60 a 130 cm de alto. Láminas involutas de 15 - 30 de largo, escabriusculas, punzantes. Láminas de las innovaciones y del culmo, isomorfas, filiformes. Panicula oblonga de 20 - 40cm de largo, laxa e interrumpa, plateada. fruto: cariopse.
Distribución y superficie (hábitat)	1900 a 4300 msnm, en etapas sucesionales tempranas de los bosques de kewiña, frecuente en terrenos pedregosos o rocosos, en pajonales altoandinos sobre suelos erosionados, pedregosos de la puna húmeda y los valles secos. Pag164 3.
Usos	Forrajera en general, aunque poco palatable.

Fuente: Gutiérrez, Gonzales, Ramírez, Mercado, & Arrázola (2013) Guía ilustrada de especies forrajeras nativas de la zona andina en Bolivia.

Anexo I

Especies de ecosistema pajonal. Localidad Cota Cota

Nro especie 11

Sitio/ Localidad: Cota Cota
 Georeferenciación: -16,53815000 -68,06101000
 Tipo de ecosistema: Pastizal
 Elevación: 3450 m.s.n.m.
 Fecha 11/08/2021



Morfo especie/ especie 1	
Especie	<i>Trifolium repens</i>
Familia	Leguminosae
Genero	<i>Trifolium</i>
Nombre común	Trébol
Formas de vida	Rastrera
Fenología	Con emergencia y brotación otoñal, vegetación invierno-primaveral y floración primaveral hasta otoñal.
Duración del ciclo biológico	Perenne
Morfología	Planta perenne de 10-50 cm. Tallos rastreros y enraizantes. Hojas trifoliadas, folíolos obovados, denticulados, a menudo con una mancha blanca en el haz. Estípulas bruscamente estrechadas en el ápice. Flores con corola blanca o rosada, membranosa en su fructificación; presentan una pequeña bráctea en su base. Cáliz con 10 nervios. Flores agrupadas en cabezuelas globosas, pedunculadas.
Distribución y superficie (hábitat)	Terrenos húmedos, a orillas de ríos, lagos, mallines y praderas.
Usos	Utilizada como forrajera y para césped en huertos, no así para campos deportivos, en los que dan mejor resultado las gramíneas.

Fuente: Gutiérrez, Gonzales, Ramírez, Mercado, & Arrázola (2013) Guía ilustrada de especies forrajeras nativas de la zona andina en Bolivia.

Nro especie 12

Sitio/ Localidad: Cota Cota
 Georeferenciación: -16,53815000 -68,06101000
 Tipo de ecosistema: Pastizal
 Elevación: 3450 m.s.n.m.
 Fecha 11/08/2021

**Morfo especie/ especie 2**

Especie	<i>Pennisetum clandestinum</i>
Familia	Poaceae
Genero	<i>Pennisetum</i>
Nombre común	Kikuyo; dulce kora
Formas de vida	Perenne
Fenología	La planta solo florece si es pastoreado o cortado.
Duración del ciclo biológico	Perenne
Morfología	<p>Tamaño: De 5-10 cm de longitud. Tallo: De corto crecimiento, marcadamente rastreros, con entrenudos cilíndricos, glabros (sin ornamentación), de 1-2 cm de longitud; nudos glabros. Hojas: Glabras o con pelos. Vainas esparcidamente vilosas en el envés a glabras, con márgenes membranosos y secos; lígula en forma de anillo de pelos de 1-2 mm de longitud, láminas foliares planas o conduplicadas (dobladitas a lo largo de su nervio medio), con el ápice obtuso, de (1.5) 2 a 9 cm de longitud, de 2 a 5 mm de ancho, glabras o esparcidamente vilosas en la base. Inflorescencia: Inconspicua, escondida entre las vainas, compuesta, con espigas cortas axilares. Sólo se pueden ver los estambres por fuera cuando florece.</p> <p>Espiguilla/Flores: Espiguilla 2 a 3 (4), de 1.4 a 1.8 cm de longitud, escasas, ocultas en las vainas superiores, una espiguilla pedicelada y las demás sésiles, pedicelo de la espiguilla de 2 a 5 mm de longitud, cada una con 15 a 16 cerdas hasta de 1 cm de longitud, glumas ausentes; lema de la flor estéril igual a la lema de la flor fértil, con varias nervaduras, pálea casi igual a la lema. Estambres y estigmas exertos. Raíz: Rizomas fuertes y estolones bien desarrollados.</p>
Distribución y superficie (hábitat)	1350-3100 m.
Usos	Forrajera

Fuente: Gutiérrez, Gonzales, Ramírez, Mercado, & Arrázola (2013) Guía ilustrada de especies forrajeras nativas de la zona andina en Bolivia.

Anexo J

Registro de dióxido de carbono capturado en la biomasa total

FECHA	LUGAR DE MUESTREO	ESPECIES RECONOCIDAS	PESO FRESCO muestra (Kg/0,25 m2)	PESO FRESCO submuestra (g)	PESO SECO submuestra (g)	PESO SECO muestra (Kg/0,25 m2)	CARBONO CAPTURADO (Kg C/m2)	CARBONO CAPTURADO (t C/ha)	INCERTIDUMBRE (±)	CO ₂ CAPTURADO (t CO ₂ /ha)	INCERTIDUMBRE (±)
25/10/2021	COTA COTA-PASTIZAL	2 ESPECIES	1,879	75,17	62,36	1,559	3,118	31,176	2,11	114,415	7,74
25/10/2021	CHOJÑAPATA-BOFEDAL	4 ESPECIES	2,611	104,45	49,12	1,228	2,456	24,558	1,14	90,127	4,19
25/10/2021	CHOJÑAPATA-PAJONAL	3 ESPECIES	0,873	69,57	59,37	0,745	1,490	14,900	1,14	54,683	4,18
25/10/2021	CALAHUANCANI-TOLAR	3 ESPECIES	0,5527	93,31	84,84	0,503	1,005	10,051	1,17	36,886	4,30

Anexo K**Biomasa generada en la parte aerea de las especies presentes en los ecosistemas**

FECHA	LUGAR DE MUESTREO	ESPECIES RECONOCIDAS	PESO FRESCO muestra (Kg/0,25 m2)	PESO FRESCO submuestra (g)	PESO SECO submuestra (g)	PESO SECO muestra (Kg/0,25 m2)	BIOMASA GENERADA (t ms/ha)	INCERTIDUMBRE (\pm)
25/10/2021	COTA COTA-PASTIZAL	2 ESPECIES	0,4187	16,75	14,52	0,363	0,726	1,96
25/10/2021	CHOJÑAPATA-BOFEDAL	4 ESPECIES	0,314	12,57	7,14	0,178	0,357	0,25
25/10/2021	CHOJÑAPATA-PAJONAL	3 ESPECIES	0,683	55,67	47,55	0,583	1,167	1,81
25/10/2021	CALAHUANCANI-TOLAR	3 ESPECIES	0,3214	43,58	39,35	0,290	0,580	1,36

Anexo L

Biomasa generada en la parte radical de las especies presentes en los ecosistemas

FECHA	LUGAR DE MUESTREO	ESPECIES RECONOCIDAS	PESO FRESCO muestra (Kg/0,25 m2)	PESO FRESCO submuestra (g)	PESO SECO submuestra (g)	PESO SECO muestra (Kg/0,25 m2)	BIOMASA GENERADA (t ms/ha)	INCERTIDUMBRE (±)
25/10/2021	COTA COTA-PASTIZAL	2 ESPECIES	1,46	58,42	47,84	1,196	23,912	2,33
25/10/2021	CHOJÑAPATA-BOFEDAL	4 ESPECIES	2,297	91,88	41,98	1,050	20,990	2,41
25/10/2021	CHOJÑAPATA-PAJONAL	3 ESPECIES	0,1873	13,9	11,82	0,159	3,185	0,49
25/10/2021	CALAHUANCANI-TOLAR	3 ESPECIES	0,2313	49,73	45,49	0,212	4,232	0,97

Anexo M**Carbono capturado por especie**

LUGAR DE MUESTREO	ESPECIES RECONOCIDAS	PESO FRESCO muestra (Kg)	PESO FRESCO submuestra (g)	PESO SECO submuestra (g)	PESO SECO muestra (Kg/0,25 m2)	CARBONO CONTENIDO (Kg C/m2)	CARBONO CONTENIDO (t C/ha)	CO ₂ CAPTURADO (t CO ₂ /ha)	INCERTIDUMBRE (±)
COTA COTA-PASTIZAL	<i>Trifolium repens</i>	0,03	46,61	38,66	0,02	0,05	0,50	1,83	0,35
COTA COTA-PASTIZAL	<i>Pennisetum clandestinum</i>	0,05	28,56	23,70	0,04	0,08	0,82	3,00	0,36
CHOJÑAPATA-BOFEDAL	<i>Plantago tubulosa</i> Decne.	0,04	36,56	17,19	0,02	0,04	0,36	1,33	0,35
CHOJÑAPATA-BOFEDAL	<i>Phylloscirpus deserticola</i>	0,04	37,60	17,68	0,02	0,04	0,37	1,37	0,53
CHOJÑAPATA-BOFEDAL	<i>Calamagrostis curvula</i> (Wedd) Pilger	0,02	15,67	7,37	0,01	0,02	0,16	0,57	0,20
CHOJÑAPATA-BOFEDAL	<i>Gentiana sedofilia</i>	0,02	14,62	6,88	0,01	0,01	0,15	0,53	0,20
CHOJÑAPATA-PAJONAL	<i>Stipa obtusa</i> (nees y meyen) Hitchc	0,04	41,92	35,81	0,04	0,07	0,72	2,63	0,63
CHOJÑAPATA-PAJONAL	<i>Festuca</i> sp	0,04	42,30	36,79	0,04	0,07	0,74	2,70	0,37
CHOJÑAPATA-PAJONAL	<i>Deyeuxia vicunarum</i> Wedd	0,03	28,11	23,56	0,02	0,05	0,47	1,73	0,36
CALAHUANCANI TH'OLAR	<i>Baccharis tola</i> Phil	0,04	43,59	39,89	0,04	0,08	0,80	2,93	0,76
CALAHUANCANI TH'OLAR	<i>Baccharis tola</i> var. <i>Chrysophylla</i> (F.H. Hellw.) Joch. Mull	0,04	42,40	38,56	0,04	0,08	0,77	2,83	0,67
CALAHUANCANI TH'OLAR	<i>Stipa ichu</i>	0,02	24,85	22,20	0,02	0,04	0,44	1,63	0,38

Anexo N
Resultados de la prueba carbono orgánico suelo y otros parámetros

ECOSISTEMA	PROFUNDIDAD (cm)	DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)	INCERTIDUMBRE (±)	CONTENIDO DE HUMEDAD %	INCERTIDUMBRE (±)	CARBONO ORGANICO (%)	INCERTIDUMBRE (±)	CARBONO POR SUPERFICIE (t C/ha)	INCERTIDUMBRE (±)
PASTIZAL	0-10	0,466	0,150	28,58	2,46	16,56	1,27	77,16	5,92
PASTIZAL	10-20	1,181	0,283	6,65	0,89	7,18	0,14	84,81	1,67
PASTIZAL	20-30	1,079	0,120	6,43	0,34	4,19	0,56	45,20	6,09
BOFEDAL	0-10	0,285	0,087	80,36	2,99	42,69	1,13	121,68	3,22
BOFEDAL	10-20	0,446	0,123	87,61	0,63	54,66	0,99	243,84	4,40
BOFEDAL	20-30	0,468	0,138	86,17	1,18	38,10	0,56	178,46	2,64
BOFEDAL	30-40	0,611	0,127	77,42	1,17	21,35	1,97	130,41	12,07
BOFEDAL	40-50	0,470	0,014	67,25	3,72	10,77	0,56	50,63	2,65
PAJONAL	0-10	0,915	0,105	10,17	2,24	13,97	1,83	127,78	16,78
PAJONAL	10-20	0,979	0,254	9,75	0,12	12,97	0,56	126,96	5,52
PAJONAL	20-30	1,185	0,227	7,46	0,32	12,97	0,56	153,66	6,69
TH'OLAR	0-10	1,336	0,155	3,48	0,75	11,17	0,28	149,26	3,77
TH'OLAR	10-20	1,241	0,076	4,57	0,19	12,77	0,28	158,44	3,50
TH'OLAR	20-30	1,241	0,064	5,03	0,69	13,17	0,14	163,40	1,75

Anexo O

Resultados carbono microbiano en el suelo

ECOSISTEMA	PROF	CODIGO	CONTENIDO DE HUMEDAD %	INCERTIDUMBRE (±)	CARBONO MICROBIANO ugC/g SUELO	INCERTIDUMBRE (±)	CARBONO ORGANICO (%)	INCERTIDUMBRE (±)	CARBONO CAPTURADO (t C/ha)	INCERTIDUMBRE (±)
PASTIZAL	0-20	M2S1	7,37	1,67	668,25	3,01	11,87	0,71	161,98	3,79
BOFEDAL	0-20	M2S2	60,69	1,81	469,22	7,98	40,40	1,06	365,52	3,81
PAJONAL	0-20	M2S3	9,16	1,18	515,63	6,63	13,47	1,20	254,74	11,15
TH'OLAR	0-20	M2S4	2,72	0,47	402,19	15,46	11,97	0,28	307,70	3,64

AUTOR: Veronica Condori Ticona

CORREO: veronicacondorit@gmail.com

CELULAR: 60640851



2024-TTES-112-D-1

DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-490/2024
La Paz, 1 de Marzo del 2024

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **23 de Febrero del 2024**, por **VERÓNICA CONDORI TICONA** con C.I. N° **10022354 LP**, con número de trámite **DA 283/2024**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: **"CUANTIFICACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO Y EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD FOTOSINTÉTICA EN SUELOS CON COBERTURA NATIVA EN ZONAS ALTOANDINAS DE BOLIVIA"**, cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el *"Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración"*.

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece *"Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión"*. En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: *"la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios"*.



Oficina Central - La Paz
Av. Montes, N° 515,
entre Esq. Uruguay y
C. Batallón Himani.
Telfs.: 2195700
2195276 - 2195251

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quijarro,
N° 29, Edif. Bicentenario.
Telfs.: 3121752 - 72042936

Oficina - Cochabamba
Calle Bolívar, N° 737,
entre 16 de Julio y Antezana.
Telfs.: 4141403 - 72042957

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, N° 2560
Edif. Multicentro El Ceibo
Ltda. Piso 2, Of. 58,
Zona 16 de Julio.
Telfs.: 2141001 - 72043029

Oficina - Chuquisaca
Calle Kilometro 7, N° 366
casi esq. Urubidagalla,
Zona Parque Bolívar.
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calle Ciro Trigo y Avanzo
Edif. Santa Clara, N° 243.
Telf.: 72005886

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre N° 582
entre Ayacucho y Junín,
Dársena Central, Of. 14.
Telf.: 4200084

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Mendoza Alba y San Alberto,
Edif. IM. Salinas N° 24,
Primer Piso, Of. 12.
Telf.: 7200810



MINISTERIO DE DESARROLLO PRODUCTIVO Y ECONOMÍA PLURAL

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley Nº 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: "...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial".

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: "... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

POR TANTO

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas

RESUELVE:

INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: "CUANTIFICACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO Y EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD FOTOSINTÉTICA EN SUELOS CON COBERTURA NATIVA EN ZONAS ALTOANDINAS DE BOLIVIA", a favor de la autora y titular: **VERÓNICA CONDORITICONA** con C.I. Nº **10022354 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.




Abg. Carlos Alberto Saruco Ayrova
**DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS**

SERVICIO NACIONAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL

CASAJAYA
C.C. Abg.



- Oficina Cochabamba - La Paz**
Av. Herrera, N° 25,
calle Sag. Orteguy y
C. Soriano Basso.
Tels.: 3399999 - 3399998
- Oficina Santa Cruz**
Av. Uruguay, Calle
Independencia (Cajón),
N° 10, 142, Sucremarte.
Tels.: 3399999 - 3399998
- Oficina Cochabamba**
Calle Bolivia, N° 175,
calle 6 de Julio y Aniceto.
Tels.: 3399999 - 3399998
- Oficina Tarija**
Av. Juan Boscán, N° 100
Calle Independencia 11200
Calle 16 de Julio, 18,
Jusem de Tarija.
Tels.: 3399999 - 3399998
- Oficina Sucre**
Calle Bolívar, N° 100
Calle Sag. Orteguy y
Calle Páez Bolívar.
Tels.: 3399999 - 3399998
- Oficina La Paz**
Av. La Paz, calle
Calle Sag. Orteguy y Sag. Orteguy
Calle Sag. Orteguy, N° 100,
Tels.: 3399999 - 3399998
- Oficina Oruro**
Calle 6 de Julio, N° 100
Calle Sag. Orteguy y Sag. Orteguy
Calle Sag. Orteguy, N° 10,
Tels.: 3399999 - 3399998
- Oficina Potosí**
Av. 25 de Mayo, Calle
Independencia 11200 y 14 de Mayo,
Calle Sag. Orteguy, N° 100,
Calle Sag. Orteguy, N° 10,
Tels.: 3399999 - 3399998