



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
INGENIERÍA AMBIENTAL



ESTIMACIÓN DEL STOCK DE CARBONO EN UNA TURBERA NOR-PATAGÓNICA DE LA REGIÓN DE AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO, CHILE

Tesis presentada para optar al título de

Ingeniera Ambiental

ISIDORA DEL PILAR MUÑOZ MALDONADO

Profesor guía: Dr. Mauricio Aguayo Arias

Profesora comisión: Dra. María Elisa Díaz Burgos

Profesor comisión: M.Cs. Jorge Féliz Bernal

Concepción, Chile 2023

“ESTIMACIÓN DEL STOCK DE CARBONO EN TUBERAS NORPATAGÓNICAS DE LA REGIÓN DE AYSÉN, CHILE”

Profesor Guía: Dr. Mauricio Aguayo Arias



Profesor Co-Guía: Dra. Ma. Elisa Díaz Burgos



Profesor Comisión: Ms. Jorge Féliz Bernal



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, marzo 2023

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	viii
RESUMEN	x
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
2.1. Turberas de Chile y su importancia biológica	5
2.2. Turberas y la captación de Carbono	7
2.3. Metodologías para cuantificar el almacenamiento de carbono	10
2.4. Manejo de turberas en el marco del cambio climático	12
3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	16
4. OBJETIVOS	16
4.1. Objetivo general.....	16
4.2. Objetivos específicos	16
5. MATERIALES Y MÉTODOS	17
5.1. Área de estudio.....	17
5.1.1. Delimitación del área de estudio y propuesta de muestreo	19
5.2. Caracterización de la composición vegetal en el área de estudio.....	21
5.3. Estimación de la cantidad de carbono contenida en el estrato superficial y subterráneo.....	23
5.4. Cuantificar el stock de carbono a través de datos satelitales	26
5.4.1. Descarga de imágenes satelitales	26
5.4.2. Extrapolación de datos y obtención de stock de carbono	30
6. RESULTADOS	31
6.1. Caracterización vegetal.....	31
6.2. Estimación del stock de carbono contenido en estratos superficiales y subterráneo.....	34
6.2.1. Secado de muestras	34
6.2.2. Obtención de la fracción de carbono	35
6.3. Cuantificar el stock de carbono a través de datos satelitales	39
6.3.1. Descarga de imágenes satelitales	39
6.3.2. Análisis de datos de imágenes satelitales en relación con fracciones de carbono	40
6.3.1. Extrapolación de datos y obtención de stock de carbono	43

7. DISCUSIÓN.....	46
8. CONCLUSIONES.....	51
9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	53
10. ANEXOS.....	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Definición de estratos y sus componentes.	23
Tabla 2. Descripción de bandas satelitales de Sentinel-2.	28
Tabla 3. Clasificación de la vegetación presente en las turberas estudiadas.	31
Tabla 4. Especies más comunes en los puntos de muestreo.....	33
Tabla 5. Porcentaje de agua contenido en las muestras de turba analizadas.	34
Tabla 6. Pesos de las submuestras luego de ser incineradas en una muffle a 550°C.....	36
Tabla 7. Cantidad de carbono contenido en cada punto en kg / m ²	37
Tabla 8. Cantidad de carbono en kilogramos contenida en el píxel donde se tomó la muestra.	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del carbono en una turbera con fases aeróbicas y anaeróbicas.	9
Figura 2. Formación de una imagen multiespectral de 20 m (14/06/2021). .	11
Figura 3. Tipos de vegetación a lo largo del gradiente minerotrófico a ombrotrófico en América del Sur.....	13
Figura 4. Área de estudio localizada en la comuna de Lago Verde, región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.	19
Figura 5. Grilla con 19 unidades muestrales.	21
Figura 6. Cuadrante general (2x2 m) y sub cuadrantes (0,5 x 0,5 m) utilizados para caracterizar vegetación.	22
Figura 7. Esquema referente a extracción de muestras para ambos estratos.	25
Figura 8. Representación ilustrada de herramienta de análisis espacial “Extraer por máscara”	30
Figura 9. Fraccionada, muestra las correlaciones de Pearson con la imagen que resultó tener mejor coeficiente de correlación y ser la más cercana a la fecha de muestreo.	41
Figura 10. Mejor correlación entre cantidad de carbono por píxel y banda satelital infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1).	42
Figura 11. Gráfica representativa de análisis de regresión lineal y el ajuste de los datos al modelo.	43
Figura 12. Área de estudio luego de aplicar herramienta “Extracción por máscara” para limitar el cálculo de carbono sólo a los píxeles correctos.	44
Figura 13. Estimación de stock de carbono contenido en cada área de la turbera.	45

ÍNDICE DE ANEXOS

Tabla Anexo 1. Alturas medidas en cada punto del cuadrante de muestreo y su respectivo promedio.....	58
Tabla Anexo 2. Fecha de imágenes descargadas y analizadas.....	59
Imagen Anexo 1. Correlación de Pearson con datos de la imagen más cercana al muestreo y sus respectivos coeficientes de correlación. 15 de mayo de 2022.	60
Imagen Anexo 2. Correlación de Pearson con datos de la segunda imagen más cercana al muestreo y sus respectivos coeficientes de correlación. 10 de mayo de 2022.	61

Lo maravilloso que es entender los procesos de la naturaleza, el asombro por la dualidad de la simpleza y la complejidad ha sido el regalo más lindo que la vida me ha dado.

AGRADECIMIENTOS

La universidad sin duda es un camino muchas veces complejo, la mayoría de las veces con más incertidumbres que certezas. Pero, siempre detrás de los momentos de dificultades, están las personas que entregan luz en el camino.

Este trabajo y mi carrera universitaria si bien es mérito propio, en gran parte se la debo a todas esas personas quienes me entregaron luz en momentos de oscuridad, aquellas personas que con simples palabras de aliento lograban arreglar el panorama y hacer que encontrara el valor necesario para enfrentar cualquier desafío.

Quisiera dar mis agradecimientos en primer lugar a mi familia, por siempre apoyarme y brindarme la oportunidad de elegir lo que me hace feliz. A mi madre por su amor y paciencia incondicional, a mi hermana mayor, que me ha visto crecer y me ha acompañado en cada paso que doy. Quisiera dar gracias por mis amigos, que a pesar de que estuviéramos en pedazos en algunos momentos, siempre nos recogíamos los unos a los otros genuinamente, gracias por darme la experiencia universitaria más linda que se puede vivir.

A mis profesores, investigadores y colegas, que desinteresadamente me brindaron sus conocimientos con la mejor de las disposiciones, haciéndome crecer profesionalmente día a día y enseñándome cómo es valorar y poner el alma en lo que uno hace con cada detalle.

También quisiera hacer un especial agradecimiento al equipo de la Fundación Kreen, por darme la oportunidad de desarrollar este hermoso trabajo, por creer en mis capacidades y alentarme ante cada desafío.

A todas las personas con las que me crucé en este camino y me aportaron sabiduría,
eternamente gracias.

RESUMEN

Los humedales son ecosistemas cruciales que contribuyen a la regulación de ciclos químicos globales y que entregan múltiples servicios ecosistémicos a la población. Entre ellos, las turberas son especialmente importantes debido a sus características biológicas únicas y su capacidad para acumular materia orgánica. Estas, desempeñan funciones ambientales vitales como la regulación del ciclo hidrológico, por su gran absorción de agua y el almacenamiento de carbono, conteniendo aproximadamente el 21% del carbono orgánico del planeta.

En Chile, las turberas se encuentran desde la región de Los Lagos hasta Magallanes y son de gran interés comercial debido a la extracción del musgo *Sphagnum*, lo que representa una amenaza para estos ecosistemas, transformándose en una urgencia la concientización de sus dinámicas y reservorios de carbono para que las personas consigan valorarlas y cuidarlas.

Este estudio caracterizó la composición vegetacional de una turbera nor-patagónica de alta montaña en la región de Aysén, identificando 26 especies con alto endemismo. Se estimó una fracción de carbono de 2312,5 ton/m² para un área de 32,18 has, evidenciando que un mal manejo de estos ecosistemas puede resultar crucial en el aporte de CO₂ a la atmósfera, lo que las posiciona como protagonistas dentro del cambio climático.

El uso de teledetección mostró una correlación positiva en cuanto al comportamiento de la vegetación reflejado en los índices de reflectancia y los datos obtenidos en el laboratorio, siendo el uso de imágenes espectrales un área prometedora en el desarrollo de futuras investigaciones.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo del mundo y en Chile, existe una amplia gama de ecosistemas que cumplen con los criterios para ser clasificados como humedal. Estos ayudan a regular importantes ciclos relacionados con la química del planeta y aumentan día a día su valor económico y su aporte a las comunidades (Díaz *et al.*, 2008).

Dentro de este importante grupo, se encuentran las turberas, que corresponden a un tipo de humedal que se singulariza por presentar múltiples características biológicas que las hacen ser ecosistemas únicos. En ellas, se sedimenta materia orgánica que se encuentra en diferentes estados de desintegración (Schlatter & Schlatter, 2004). Se estima que esta acumulación de materia está compuesta en su mayoría por agua (90%), correspondiendo el resto de su composición a remanentes de plantas propias de ambientes acuáticos (10%) (CKPP, 2008). Sobre esta acumulación de materia orgánica, por lo general, se forma un manto de materia viva, conformado por vegetación única, siendo predominante en la mayoría de los casos, el musgo *Sphagnum sp.* que posee diversas propiedades de gran interés ecológico y económico, primando su capacidad de retener agua (Iturraspe & Roig, 2000).

Esta acumulación de turba ocurre debido a la composición biológica de la vegetación viva de la superficie, dado que, son plantas que poseen la extraordinaria capacidad de conservar la humedad del medio, atraen iones básicos y a su vez descargan iones de hidrógeno, intensificando la acidez del entorno (Schofield, 1985), lo que provoca que el desarrollo de agentes descomponedores como bacterias, resulte inviable, ocurriendo así un desequilibrio entre la producción del estrato biológicamente activo y la descomposición de este mismo (Díaz *et al.*, 2008),

acumulándose, con el tiempo, esta materia porosa y esponjosa, que lleva por nombre, turba.

Las turberas presentan variadas funciones ambientales, así como también valores asociados al desarrollo de la vida tal como la conocemos. Una de las funciones más conocidas, es la regulación del ciclo hidrológico, ya que, gracias a su gran capacidad de absorción, poseen grandes reservorios de agua subterránea, siendo muy relevantes en el control de la sequía y escasez hídrica. Además, debido a las características del musgo *Sphagnum sp.* es que las turberas suelen ser ecosistemas filtradores de agua, por lo que mejoran considerablemente la calidad de esta (Iturraspe, 2010).

La diversidad de especies que en ellas habita, convierten a estos ecosistemas en refugios de la singularidad y riqueza genética, dado que las condiciones que la vegetación existente provee ponen al límite las posibilidades de sobrevivir para la especie común, albergando una gran riqueza en flora y fauna (Ramsar, 2004). Lo que a través del tiempo ha contribuido en el estudio y entendimiento de sus dinámicas.

Sin dudas, una de las relaciones más importantes de este ecosistema, es con el ciclo del carbono, ya que las turberas dan forma a uno de los almacenes más considerables del planeta, estimando que contienen aproximadamente el 21% del carbono orgánico de la Tierra (Hoyos-Santillan *et al.*, 2021), lo que equivaldría a 1/3 de la reserva global (Clymo *et ál.*, 1998), esto, dado por su lenta tasa de descomposición de biomasa (Clymo., 1996). A su vez, estas áreas se caracterizan por su dualidad, ya que pueden convertirse en una fuente emisora de carbono hacia la atmósfera cuando son alteradas por actividades como la explotación, el drenaje

o las sequías (Leifeld et al., 2019). Este proceso las transforma en simultáneo en sumideros y fuentes de carbono, lo que incrementa el riesgo de acelerar el cambio climático, impulsado en gran medida por la actividad humana.

Mundialmente, las turberas a través del tiempo han revelado su distribución en zonas de altas latitudes y en ambos hemisferios (León *et al.*, 2021), áreas que presentan precipitaciones constantes y frías temperaturas que oscilan entre los 5 y 6 °C para hacer proliferar el crecimiento de su vegetación única (Ruthsatz *et al.*, 1991). Esto guarda directa relación con el origen de estos ecosistemas, puesto que las turberas más milenarias, se han formado en el agua luego del periodo del retroceso glacial. Siendo otro origen también la anegación de terrenos luego de la quema y tala de bosques nativos en los polos de los territorios (León *et al.*, 2014).

En Chile, las turberas tienen lugar desde la región de Los Lagos hasta Magallanes, creciendo al límite del bosque, combinando sus colores y vegetación con los bosques siempre verdes de la Patagonia, creciendo en las bajas temperaturas de la tundra magallánica o en los húmedos suelos de la Isla de Chiloé (Ramírez *et al.*, 2014). Tanto en la isla como en la Patagonia, estos ecosistemas tienen algo en común, sus múltiples beneficios, que los hacen de interés comercial, transformándose la extracción de turba, específicamente del musgo *Sphagnum* en la fuente principal de sustento para muchas familias que lo comercializan por toneladas, desconociendo por completo el efecto negativo que puede tener la explotación indiscriminada de musgo. Un mal manejo en la extracción de pompón ocasiona la liberación directa a la atmosfera de CO₂ en magnitudes incalculables, además de la pérdida de vegetación única y la muerte de uno de los únicos reservorios de agua dulce del planeta.

Bajo esta gigante amenaza es que se vuelve urgente entender las dinámicas de las turberas, conocer sus reservorios de carbono, cómo preservarlas y valorar estos maravillosos y aún desconocidos ambientes.

2. ANTECEDENTES

2.1 Turberas de Chile y su importancia biológica

Los humedales son conocidos mundialmente por ser ecosistemas ricos en biodiversidad y por su alta productividad. Cumplen funciones de vital importancia para el hombre, como lo es la regulación del ciclo hidrológico y la obtención de recursos para las poblaciones (Blanco, 1999).

La definición de humedal según RAMSAR , 2004 indica que estos son, “extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”, siendo las turberas bastante representativas dentro de esta definición, dado que conforman más del 50% de los humedales a nivel mundial (Iturraspe, 2010).

La turba, es considerada como un sedimento de origen natural y poroso, el cual está conformado por materia orgánica que se encuentra parcialmente en fase de descomposición y que se localiza en un medio acuoso (Hauser, 1996). Está compuesta al menos de un 90% de agua y 10% de restos de plantas de ambientes húmedos como líquenes y briofitos (CKPP, 2008). Adjudicándose así, el termino tubera a una acumulación de turba, con un espesor que idealmente debe oscilar entre los 30 a 40 cm (Díaz, 2008; Hauser, 1996).

Mundialmente, las turberas se encuentran en latitudes altas en ambos hemisferios, y en el extremo sur de Chile, zona reconocida mundialmente como “Patagonia”, específicamente en las regiones XI y XII, es donde estas alcanzan su mayor

crecimiento, en el que el frío clima, dominado por la orografía regional, su régimen pluvial, historia geológica y desarrollo vegetacional, proporcionan las condiciones óptimas para la formación de turberas (Hauser, 1996).

Generalmente, en Chile, se encuentran dos tipos de turberas, dependiendo de su causalidad; de origen natural, desarrolladas luego del retroceso glaciar, donde las zonas de depresión formadas luego de la actividad geológica y rebosantes de ríos y meandros, dieron origen a lagos, lagunas y diminutas cuencas endorreicas, que, en conjunto con un singular clima ayudaron a la formación y crecimiento de vegetación de tipo esteparia, formaciones de musgo *Sphagnum*, dando paso a la creación de ambientes anaeróbicos y con ello, a la acumulación de materia orgánica (Hauser,1996). Por otra parte, existen las turberas antropogénicas, que se han formado por anegamiento posterior a la quema o tala de bosques que se caracterizaban por tener un escaso drenaje (León *et al*, 2012). Estas últimas, aparecieron posterior a la colonización de la zona sur de Chile, alrededor del año 1850, en donde se realizaban masivas quemas de bosque, dado que estos, se consideraban un limitante para la colonización (Armesto *et al*, 1994).

Las turberas, son de gran importancia en el ciclo hidrológico, dado que una de sus principales características, es la absorción de agua proveniente de las precipitaciones o cuerpos de agua cercanos (León *et al*, 2012), lo que las convierte en auténticos reservorios hídricos, sobre todo, para áreas geográficas como islas, en donde no existe un deshielo directo desde la cordillera, dificultando así, la obtención de agua dulce para la población. Sumándose a dichas funciones, es que también se puede agregar la capacidad de filtrado del agua que estas desarrollan,

ya que actúan como filtro ante sedimentos que pudieran existir y también como fijadoras de metales pesados (Clymo *et al*, 1982).

Además, dado el ambiente anaeróbico y de limitado drenaje en que se desarrollan las turberas, es que se caracterizan por poseer una singular y variada diversidad de especies (Hauser, 1996), por lo que se consideran lugares de gran importancia ecológica, siendo el hábitat de ejemplares únicos, en cuanto a flora y fauna (Blanco *et al*, 2004). La principal especie que domina a estos ecosistemas, específicamente en el sur de Chile, es el musgo del género *Sphagnum* y algunas especies de tipo gramíneas, las cuales crean un ambiente pobre en oxígeno, ácido y bajo en nutrientes (Díaz *et al*, 2008), siendo esta, la determinante del singular desarrollo de vida en estos ecosistemas.

Por otro lado, se ha considerado que, las turberas, resultan ser un valioso índice paleoambiental, dadas sus especiales condiciones anóxicas, que logran una buena conservación a través del tiempo de restos arqueológicos y registros paleobiológicos, que ayudan a comprender pretéritas alteraciones climáticas y paisajísticas (Ramsar, 2004).

2.2 Turberas y la captación de Carbono

Una parte importante dentro del ciclo de vida en los ecosistemas es la formación de materia orgánica a partir de los remanentes de organismos que han dejado de existir, donde, los ciclos biogeoquímicos de la tierra cumplen el importante rol de ciclar, con el fin de que la materia orgánica vuelva a formar parte del medio a través de la fijación de C y N al suelo (León *et al*, 2011).

Desde tiempos remotos, uno de los procesos más relevantes para el desarrollo de la vida en la tierra, es el ciclo del Carbono, el cual consiste en la recolección del flujo de Carbono junto con los procesos biológicos, físicos y químicos que lo controlan, entre los diferentes depósitos de este elemento en la tierra, creando así, un constante intercambio de C entre atmósfera y suelo (Martín-Chivelet, 2010).

Las turberas, son consideradas como uno de los ecosistemas más influyentes en el ciclo del carbono y el cambio climático, dado que almacenan hasta 10 veces más carbono que cualquier otro ecosistema (Joosten *et al*, 2008). Estas contienen aproximadamente un tercio de la reserva global de carbono y representan tan sólo del 3 al 6% de la superficie de la tierra (Charman, 2002). Se estima que, a nivel mundial, las turberas contienen aproximadamente 550 Gt de carbono almacenado en su turba, lo que, traducido a proporciones, corresponde al 75% de todo el carbono atmosférico y al 30% de la totalidad del carbono existente el suelo (Parish *et ál.*, 2008).

La gran tasa de acumulación de turba y por consecuencia, el exceso de carbono se explica en el mecanismo que sigue el ciclo de este elemento en turberas. Normalmente en gran parte de los ecosistemas, el ciclo del carbono se efectúa por completo, donde existe un equilibrio entre la productividad y la descomposición. Para las turberas, este ciclo, ocurre de manera incompleta dado que, por las condiciones de saturación y anoxia que presenta su medio, dificultan el proceso de descomposición provocando una acumulación de materia orgánica y con ello un aumento de la tasa de carbono anual (Iturraspe, 2010).

A continuación, en la Figura 1, se representa el ciclo del carbono en una turbera, diferenciando sus dos principales estratos, donde la mayoría de la actividad se

concentra en el medio aeróbico, siendo más dinámica la descomposición y liberación de CO_2 . Las emisiones de CH_4 aumentan con el ascenso temporal del nivel freático. Finalmente, la formación del catotelm termina por completarse cuando se agregan a él, los sobrantes del balance de carbono en el acrotelm (Iturraspe, 2010; Parish *et ál.*, 2008).

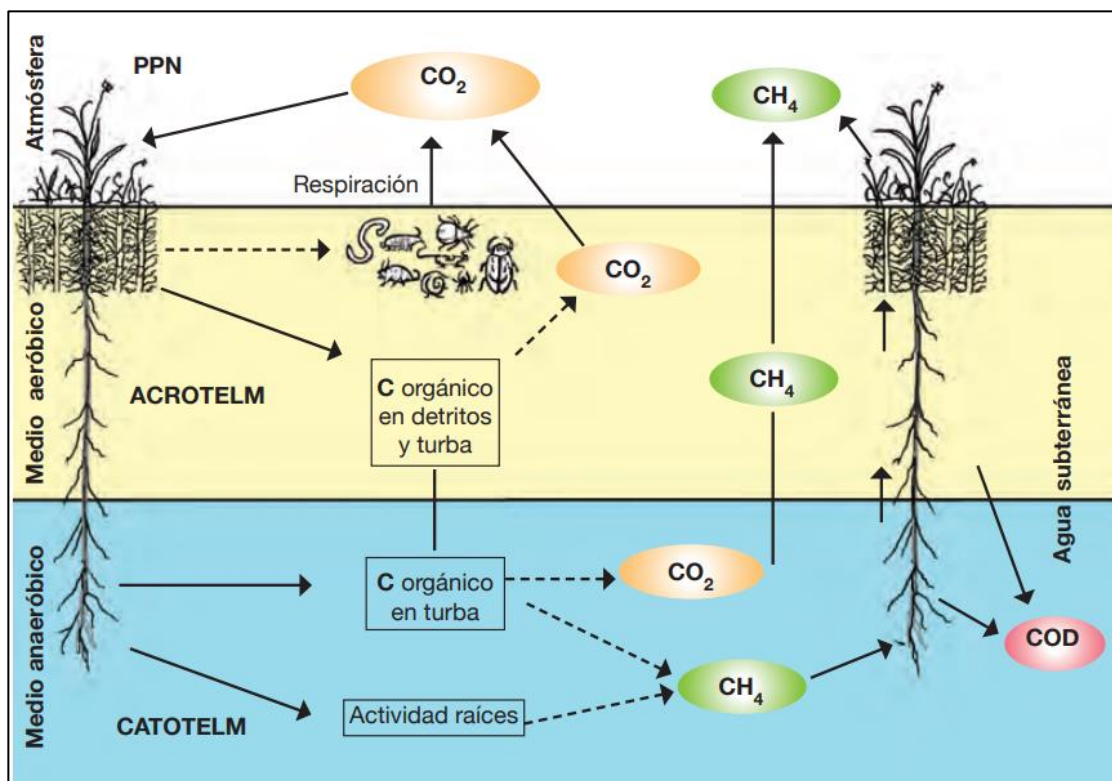


Figura 1. Ciclo del carbono en una turbera con fases aeróbicas y anaeróbicas.

Fuente: Extraído de. (Iturraspe, 2010).

Además de ser eficientes secuestradoras de CO_2 , las turberas son potenciales fuentes de emisión de importantes Gases de Efecto Invernadero (GEI) como CO_2 y CH_4 cuando resultan afectadas por un mal manejo como el drenaje de turberas, donde la turba seca entra en contacto con el aire, produciendo la descomposición y oxidación de esta, liberando CO_2 al ambiente (León *et al*, 2018), es por esto por lo que, son de gran relevancia para la problemática del cambio climático.

2.3 Metodologías para cuantificar el almacenamiento de carbono

Comprender el mecanismo de secuestro de carbono, actualmente, es de gran utilidad para poder entender cómo ocurre el ciclo de este en la tierra, existiendo así, diversas escalas de tiempo para medirlo y estudiar cómo incide en el calentamiento global (León *et al*, 2018).

La medida de la captación de carbono de un ecosistema es una práctica que comprende variadas técnicas, sin embargo, entre ellas predominan dos tipos; percepción remota y estimación directa, o en su defecto, la combinación de ambas. La medición por percepción remota mediante imágenes multiespectrales se ha transformado en la principal herramienta para la medición de carbono en vegetación, dado que es una herramienta de bajo costo, con resultados fidedignos y que puede abarcar grandes áreas (Lu, 2006). Ésta es llevada a cabo desde distintos enfoques de tipo predictivo, los cuales se realizan principalmente a través de modelos matemáticos lineales y algunos no paramétricos, basados en aproximaciones (Castillo, 2017), siendo estrictamente necesaria la existencia de datos de carbono con los que se puedan relacionar los modelos. Estos datos se pueden obtener de dos formas; a través de toma de muestras *in situ* y posterior análisis de laboratorio, donde se estiman pesos, porcentajes de humedad y fracciones de carbono, o bien, emplear datos existentes en la literatura, reportados anteriormente y que apliquen para la misma área de estudio (EULA, 2021).

El análisis con percepción remota o teledetección también implica la obtención y estudio de imágenes digitales capturadas desde satélites artificiales. Estas imágenes son capturadas gracias a sensores fotoeléctricos que traducen los niveles de radiancia de la superficie, es decir, el comportamiento de las distintas coberturas

terrestres a valores numéricos, donde cada valor, corresponde a un píxel que refleja la radiancia de la superficie. Estos valores, medidos en distintos parámetros del espectro electromagnético conforman bandas, que finalmente forman una matriz tridimensional, dando origen así, a una imagen multispectral (Pérez *et ál.*, 2006).

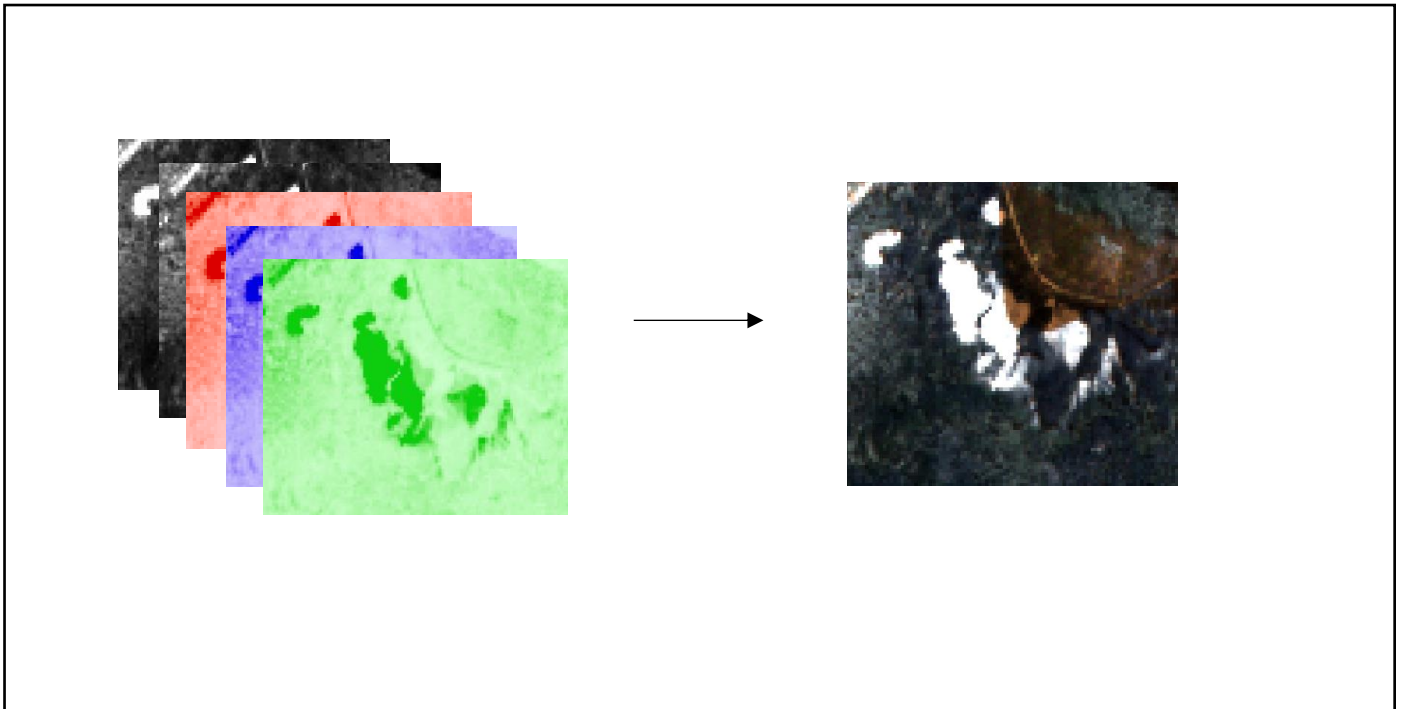


Figura 2. Formación de una imagen multispectral de 20 m (14/06/2021).

Fuente: Modificado de. (Henríquez, 2021).

Por otra parte, la estimación directa corresponde a la medición *in situ* de flujos de carbono a través de instrumentos de medición automática, para posteriormente realizar modelaciones matemáticas que se ajusten a los parámetros y objetivos del estudio (Olivares, 2017).

En términos generales, los flujos de carbono se miden mediante una función matemática (1) determinada por la concentración de flujos de CO₂ y dirección vertical del viento.

$$(1) \quad F = w \times C$$

Siendo w , la desviación de la velocidad media vertical del viento y C la desviación de la concentración de la masa media de CO₂. Donde, para la obtención de estos datos es necesario emplear métodos estadísticos, como técnicas de covarianza turbulenta que, calcula tasas de intercambio de gases entre la tierra y la atmosfera, utilizando datos como flujo de CO₂, vapor de agua, dirección y velocidad del viento, proporcionados por sensores instalados en lugares estratégicos y que cumplen con la función de recolectar dichos datos (EULA, 2021).

2.4 Manejo de turberas en el marco del cambio climático

Mundialmente, la diversidad vegetal en las turberas depende de su naturaleza y en el medio en que se desarrollen, es decir, su pH, disponibilidad de nutrientes y tipo de turbera (León *et ál.*, 2021).

Chile se caracteriza por poseer dos tipos de turberas; minerotróficas, que se alimentan de aguas basales y con gran carga mineral, y ombrotólicas, las cuales se sustentan solo con precipitaciones. Es gracias a la topografía del país y específicamente en la Patagonia, que se dan condiciones propicias entre esculpidos glaciares y numerosos valles depresionarios, para dar origen al crecimiento de vegetación con características únicas, siendo uno de los principales componentes de tipo biológico el musgo *Sphagnum* (Díaz *et al*, 2005; Hauser, 1996).

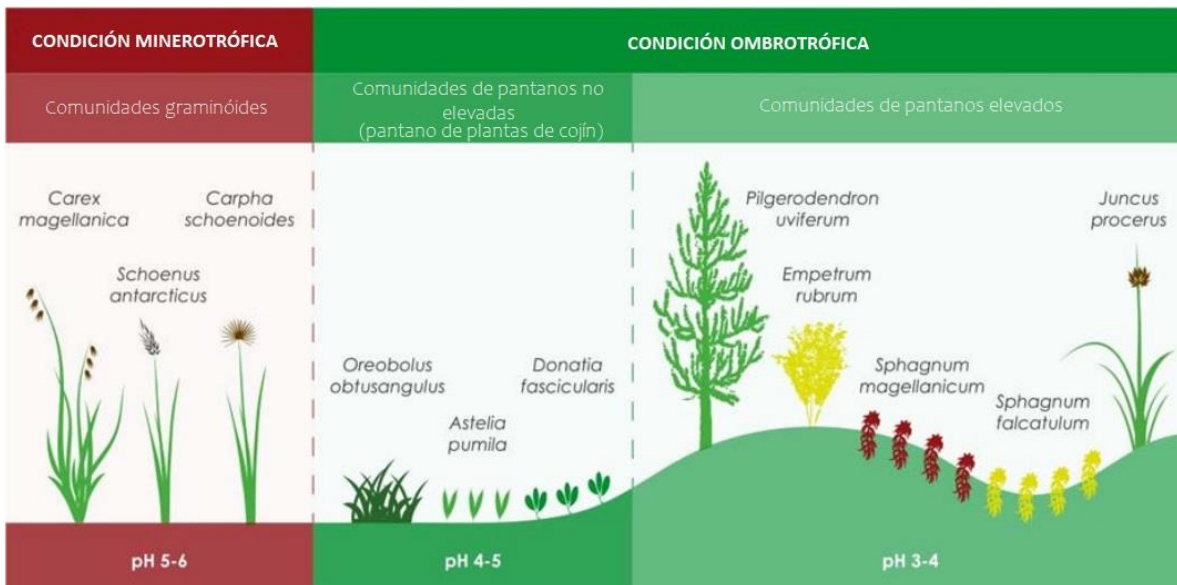


Figura 3. Tipos de vegetación a lo largo del gradiente minerotrófico a ombrotrófico en América del Sur.

Fuente: Modificado de. (León *et ál.*, 2021).

El musgo *Sphagnum* es de gran interés económico a nivel mundial, ya que es utilizado como retenedor de nutrientes, sustrato para viveros y combustible (León *et al*, 2012). Otros usos conocidos son el tratamiento de aguas residuales por su alto poder filtrante, el aislamiento térmico y acústico (Hauser, 1996), también, posee propiedades antisépticas, por lo que es de gran interés en la industria farmacéutica estadounidense para extraer el compuesto sphagnol, que es utilizado para la curación de psoriasis, eczemas y otras afecciones de la piel (Vargas, 2013).

Es por esta alta demanda que, la extracción de turba data del año 1800, resultando las turberas, sometidas a grandes explotaciones a nivel mundial, ya sea por la extracción directa del musgo para comercializarlo o por el drenaje de estas con la finalidad de aprovechar el suelo para actividades agrícolas (Díaz *et al*, 2005).

En Chile, el musgo *Sphagnum* se encuentra desprovisto de leyes que prohíban su extracción, por lo que se ha convertido en uno de los principales aportes a la economía del país mediante la exportación de PFNM (Productos Forestales No Madereros), liderando cada año las estadísticas de mercado exterior.

Para el año 2019 la exportación de *Sphagnum* alcanzó los US \$21 millones FOB, lo que corresponde al 24,5% de los PFNM que se comercializan en el país (Salinas *et al*, 2021). Ocupando los principales lugares como importadores de este producto, Taiwán, Estados Unidos, Japón y China. (Vargas, 2013). A pesar de que las estadísticas de años anteriores indicarían una futura alza en cuanto a la extracción y comercialización de turba, el año 2020 se observó una notoria baja en su exportación, la cual alcanzó los US \$17 millones, observándose una caída del 16,8% (INFOR, 2021). Esta variación se atribuye a la puesta en marcha del Decreto N°25 el cual establece la regulación, protección, conservación del recurso y también incluye instrucciones para realizar una correcta colecta de *Sphagnum*, con la finalidad de asegurar una extracción sustentable de este, además de presentar un plan de cosecha al Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). alguna de las medidas exigidas por este decreto corresponde a la extracción manual o con herramientas como horquetas o similares, que el largo de la hebra cosechada no supere los 15 cm, garantizar que permanezca al menos el 30% del paño cosechado y asegurar la rotación de las áreas de cosecha (INIA, 2020).

Resulta evidente relacionar las bajas en el movimiento de exportación con el periodo COVID (2020-2021) , donde las actividades y movilidad de la población se mantuvo limitada, siendo esto reflejado en la estadística del año 2022, donde se concreta el pronóstico estadístico registrando el aporte por exportación del musgo *Sphagnum*

un aumento del 109,0% para el último periodo registrado (enero- junio 2022) traduciéndose esto en un monto de US \$20 millones (INFOR, 2022), lo que coincide con el termino de restricción en las actividades asociado al fin de la pandemia y la persistente falta de políticas restrictivas en cuanto a extracción del país.

A nivel mundial, se han tomado medidas similares, como la promulgación de decretos de uso para potenciar la conservación de turberas y el manejo sustentable de estas. Canadá, Australia y Tasmania son algunos de los países que optan por la extracción manual y el trasplante de *Sphagnum* para lograr la regeneración del musgo en sitios en los que ya no existe (Díaz *et al*, 2005).

3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es el actual stock de carbono almacenado en una turbera de la región de Aysén, Chile?

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Evaluar el stock de carbono en una turbera nor-patagónica de la región de Aysén utilizando técnicas de percepción remota.

4.2 Objetivos específicos

- I. Caracterizar la composición vegetal del área de estudio.
- II. Estimar la cantidad de carbono contenida en el estrato superficial y subterráneo.
- III. Cuantificar el stock de carbono a través de datos satelitales.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Área de estudio

El área de estudio se sitúa en la región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, específicamente en la comuna de Lago Verde, ubicada entre los 44° 14' latitud sur y 71° 51' longitud oeste. Esta comuna presenta una superficie de 5422,3 km² (Biblioteca del Congreso Nacional, 2021), que forman parte de la especial geomorfología de la región, acompañada de glaciares, volcanes, precipitaciones y fuertes vientos es que dan paso a un clima frío oceánico de temperaturas bajas, con copiosas lluvias y abundante humedad, el cual puede transmutar gracias a las diferencias de relieve existentes a lo largo de la región (Biblioteca del Congreso Nacional, 2023).

El uso de suelo está representado en su mayoría por nieves y glaciares con un 45% del territorio, seguido de cuerpos de agua (31,6%), bosques (24,6%) y humedales (12,6%) (CONAF, 2013). Se estima que para la región de Aysén un total de 2526 ha corresponden a turberas de *Sphagnum* (16,6%), y específicamente para la comuna de Lago Verde 564 ha corresponderían a turberas, lo que representa al 3,7% del total de la superficie regional (Villaruel et ál., 2021). Esta zona, producto de sus valles adultos, ricos en cauces de ríos sinuosos y la formación de ambientes con poco drenaje, es dominada por turberas bajas o de pantano, que se han desarrollado en terrazas fluvio-aluviales sustentadas por aguas subterráneas someras y que dan origen a un fuerte poblamiento de vegetación acuática (Hauser, 1996)

En cuanto a la demografía, Lago Verde presenta una población de 852 habitantes, que se desarrollan en un entorno rural, lo que se ve reflejado en la alta tasa de

hogares carentes de servicios básicos, donde al menos 35,5% de los hogares no cuenta con dichos servicios. En relación con el desarrollo económico, los habitantes de esta comuna presentan una alta actividad en los servicios de agricultura, ganadería, silvicultura y pesca, el cual representa un 60% de la fuerza trabajadora. Ocupando el segundo lugar, el rubro de comercio y alojamiento, esto relacionado al gran potencial turístico de la región (Biblioteca del Congreso Nacional, 2021).

A continuación, en la Figura 4 se presenta el área de estudio, específicamente las turberas a investigar. El área esta referenciada geográficamente bajo el Sistema Geodésico de Coordenadas (WGS 84), proyectado cartográficamente bajo el sistema Universal Transversal de Mercator (UTM) huso 19 sur.

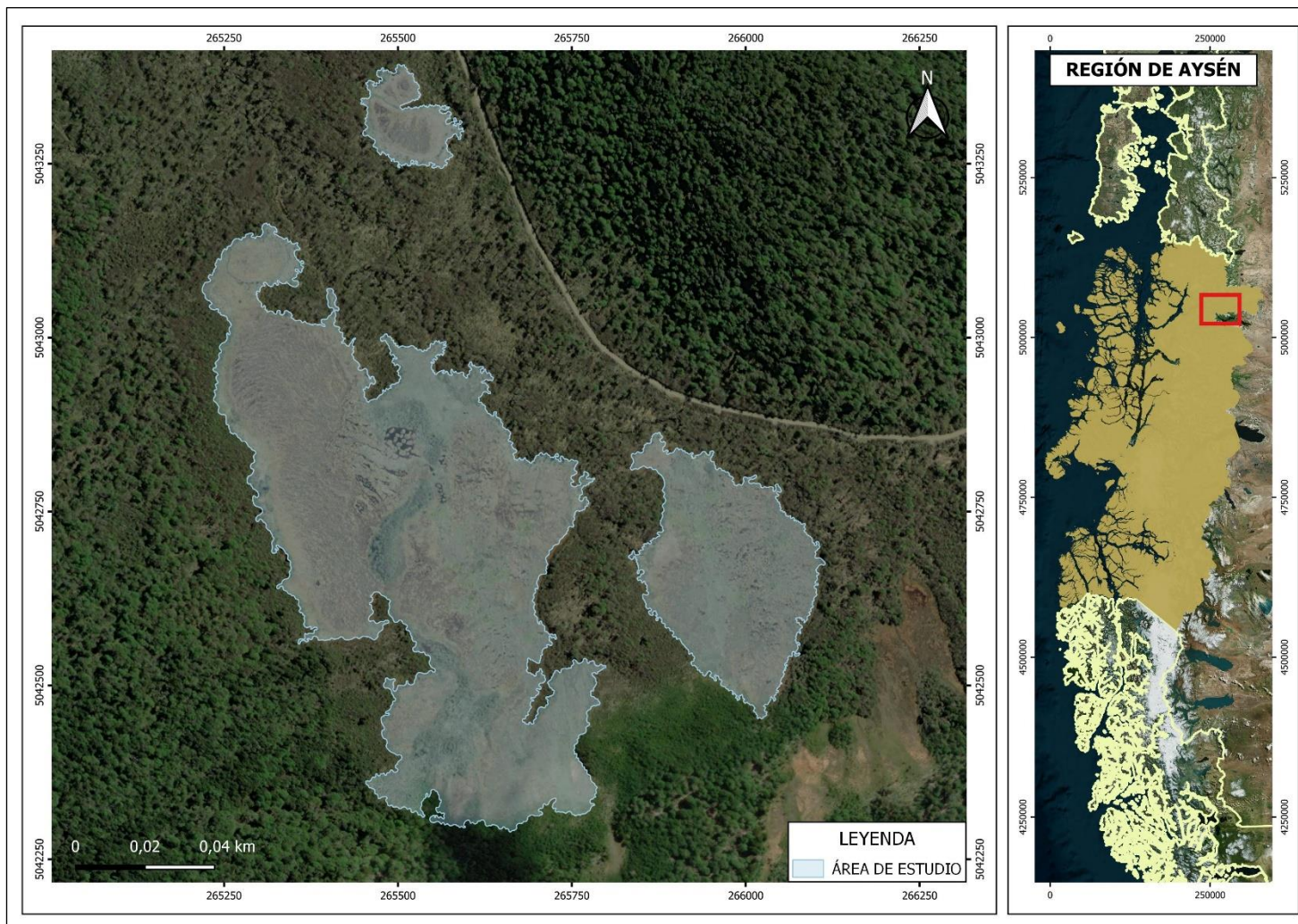


Figura 4. Área de estudio localizada en la comuna de Lago Verde, región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.1 Delimitación del área de estudio y propuesta de muestreo

El área objeto de estudio se seleccionó bajo criterios de accesibilidad y cumplimiento de características que fueran de interés para esta investigación. Se delimitaron tres turberas cercanas que representan un total de 32,18 has en conjunto, correspondiendo al 5,7% del total de turberas de la comuna. Dada la

extensión de las turberas, se buscó realizar un muestreo metódico que resultara lo más representativo posible, por lo que se trabajó con una grilla de puntos equiespaciados cada 120 metros para obtener un mejor ajuste a la resolución de la imagen satelital Sentinel 2 (20 m) (Cabezas, 2015). La grilla de muestreo se realizó originalmente con una propuesta de 40 puntos, de los cuales sólo se lograron muestrear 19, que fueron elegidos en terreno estratégicamente, cuidando representatividad y efecto borde, es decir, puntos que no fueran cercanos a los límites del área, para evitar la confusión visual al momento de trabajar con imágenes satelitales. La merma de sitios de muestreo se realizó considerando las duras condiciones climáticas de invierno, lo que conllevaba la presencia de abundante nieve que complejizó el trabajo.

A continuación, la Figura 5, representa la grilla de muestreo utilizada y ajustada en terreno con 19 puntos, referenciada geográficamente bajo el Sistema Geodésico de Coordenadas (WGS 84) proyectado cartográficamente bajo el sistema Universal Transversal de Mercator (UTM) huso 19 sur.

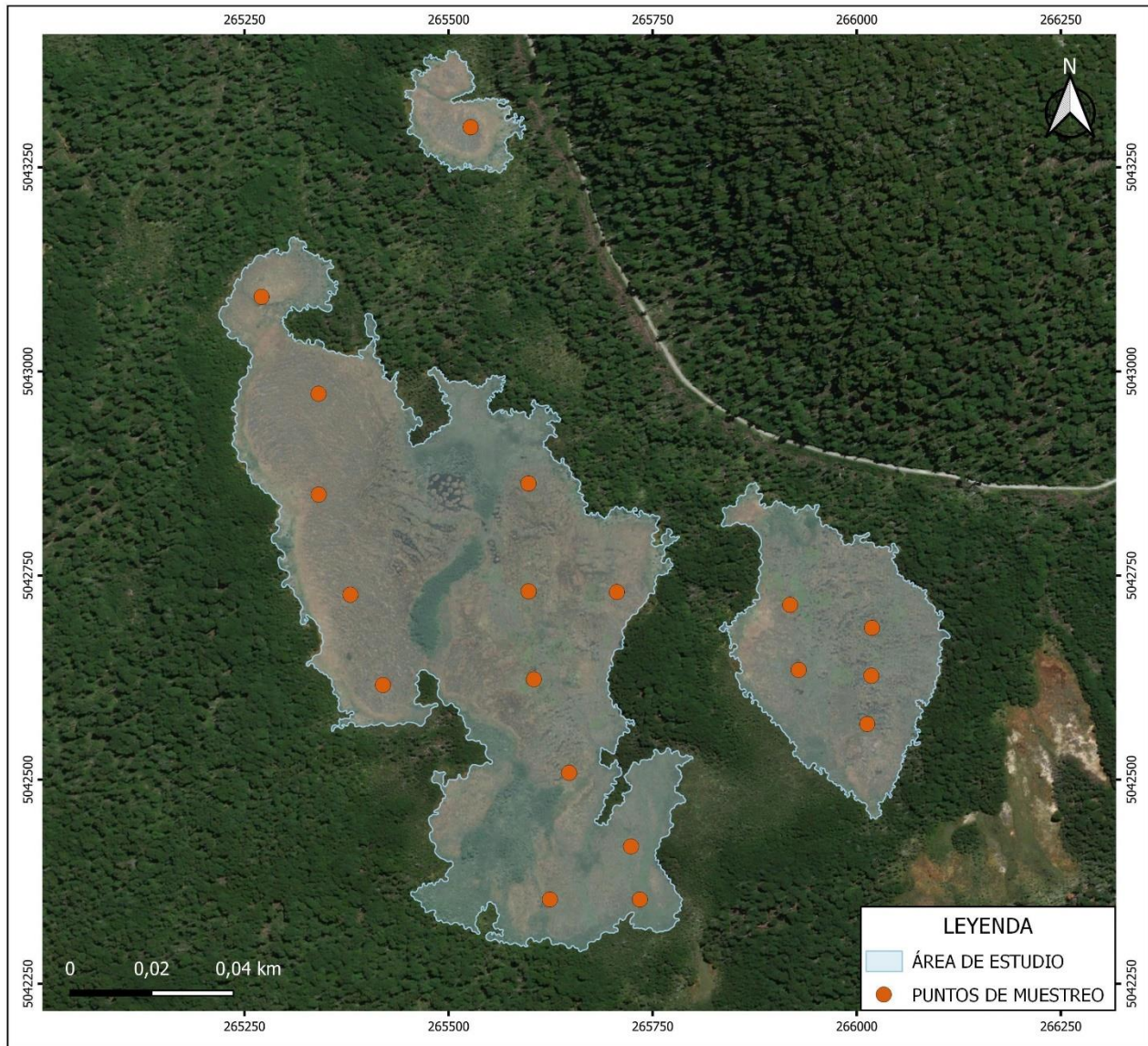


Figura 5. Grilla con 19 unidades muestrales.

Fuente: Elaboración propia.

5.2 Caracterización de la composición vegetacional en el área de estudio

Para el análisis vegetacional se realizó un muestreo detallado en cada punto. Dada la existencia de nieve abundante, fue necesario despejar previamente los puntos de muestreo con ayuda de palas. Una vez descubierto el suelo, se extendieron

conjuntamente sub cuadrantes de 50 (cm) x 50 (cm), con el fin de completar un cuadrante general de 2 (m) x 2 (m) para cada punto (Díaz *et ál.*, 2008). Allí se identificaron especies presentes en cada uno, siendo un total de 16 sub cuadrantes para cada punto. Se determinaron hábitos de crecimiento, medición de altura en nueve vértices del cuadrante y familias a las que las especies pertenecen buscando precisar las principales formaciones y asociaciones vegetales, así como también a las especies más numerosas en el área de estudio. La Figura 6 representa esquemáticamente cómo se utilizaron los cuadrantes en terreno.

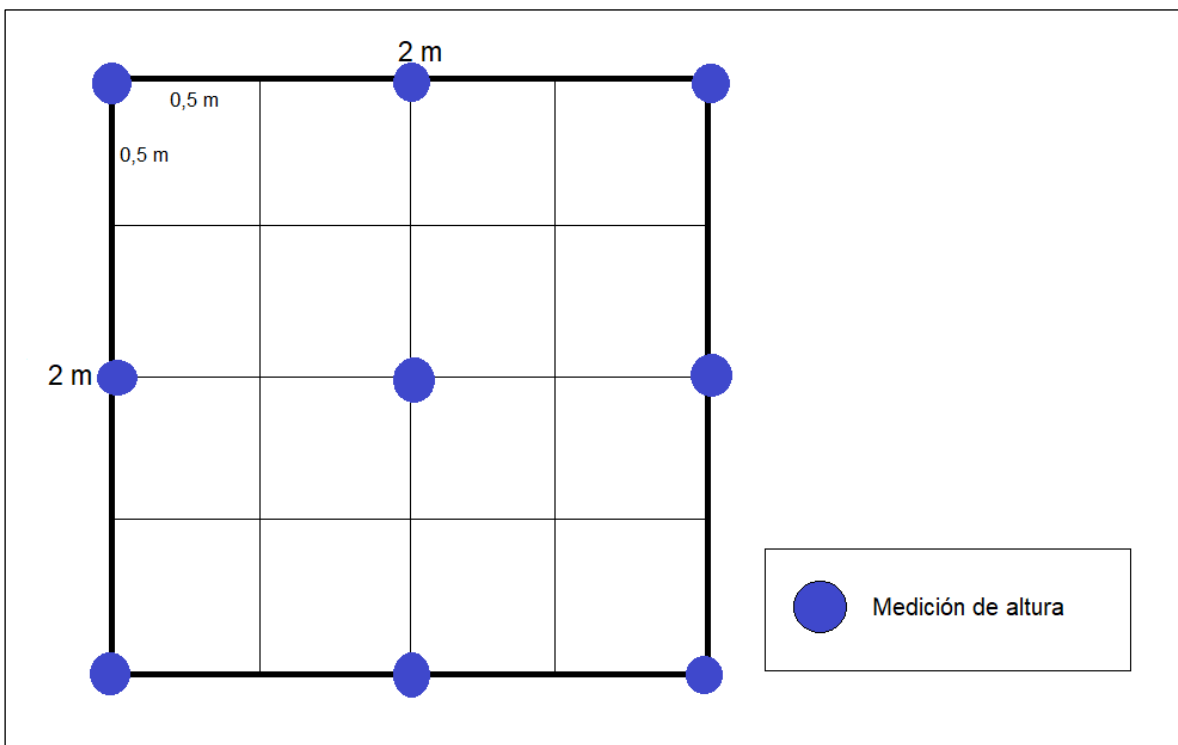


Figura 6. Cuadrante general (2x2 m) y sub cuadrantes (0,5 x 0,5 m) utilizados para caracterizar vegetación.

Fuente: Modificado de. (Cabezas, 2015).

Posteriormente los datos fueron sistematizados en el software Microsoft Excel, donde se realizó la validación de la información obtenida *in situ* utilizando la

literatura como herramienta principal. Adicionalmente se realizaron análisis de medias de cobertura y altura.

5.3 Estimación de la cantidad de carbono contenida en el estrato superficial y subterráneo

Para realizar cálculos de carbono, fue necesario dividir el muestreo en dos estratos; superficial y subterráneo, donde superficial comprende a la vegetación viva, específicamente plantas vasculares que crecen sobre la turba, mientras que el subterráneo, hace referencia a la materia orgánica en descomposición y residuos de raíces, es decir, la turba (Cabezas, 2015).

Tabla 1. Definición de estratos y sus componentes.

Estrato	Componente	
Superficial o aéreo	Arbustivo	Árboles y/o arbustos que componen el estrato.
	Herbáceo	Hierbas perennes o anuales (incluido musgo) que componen el estrato.
	Troncos	Troncos muertos caídos.
	Detrito superficial grueso	Diámetro mayor a 5 mm.
	Detrito superficial fino	Diámetro menor a 5 mm.
Subterráneo	Musgo vivo	Se reconocen perfectamente las plantas (vivas).
	Detrito grueso	Diámetro mayor a 5 mm.

	Detrito fino	Diámetro menor a 5 mm.
	Turba ligeramente descompuesta	Se reconocen fácilmente partes de las plantas.
	Turba medianamente descompuesta	Es difícil reconocer partes de las plantas, se reconocen mayoritariamente raíces.
	Turba completamente descompuesta	No se reconocen partes de las plantas.

Fuente: Extraído de. (EULA, 2021)

Para tomar muestras en el estrato superficial, se utilizó el mismo cuadrante empleado para la caracterización vegetal, esta vez posicionado en el centro del cuadrante general (2 (m) x 2 (m)) y proyectado verticalmente, esquematizado en la Figura 7. Para cada punto se realizó la extracción de una muestra de área de 0,25 m², que fue pesada en terreno y a la cual se le extrañó una submuestra de peso 1 kg aproximadamente que fue almacenada herméticamente en bolsas plásticas hasta esperar su posterior análisis de laboratorio (Cabezas, 2015).

Análogamente, para el estrato subterráneo se realizó la extracción de una muestra cilíndrica en el centro del subcuadrante, de diámetro 10 cm y longitud 20 cm, con ayuda de un barreno muestreador de raíces simple, el cual alcanza una profundidad de 1 (m). Estas muestras fueron pesadas en terreno y almacenadas en bolsas herméticas hasta su análisis de laboratorio (Cabezas, 2015; EULA, 2021).

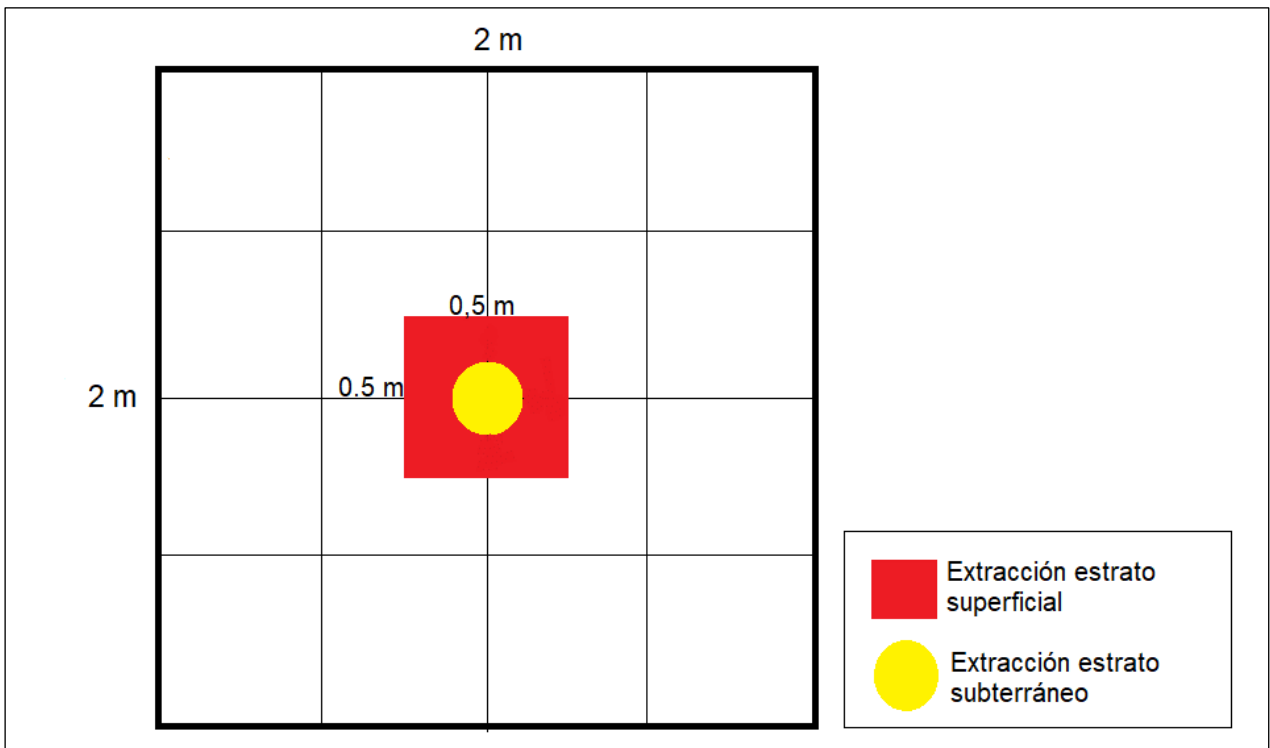


Figura 7. Esquema referente a extracción de muestras para ambos estratos.

Fuente: Modificado de. (Cabezas, 2015).

Las muestras de ambos estratos, una vez en el laboratorio, fueron pesadas nuevamente para chequear su ganancia o pérdida de humedad, se extrajo una submuestra de 60 gramos la cual se pesó y se dispuso en placas de Petri para aplicar secado constante en un horno a 70° C por 72 horas, siendo la finalidad, que la muestra alcance un peso seco estable y pierda toda su humedad. Luego de completar el tiempo de secado las muestras fueron pesadas nuevamente, lo que permitió calcular el porcentaje de humedad que en ellas habitaba.

Posteriormente, para el cálculo de carbono orgánico, las muestras fueron incineradas en una muffle, a 550 °C por 12 horas, donde el contenido de carbono orgánico resultó ser la diferencia de pesos entre las muestras secas y las incineradas.

5.4 Cuantificar el stock de carbono a través de datos satelitales

5.4.1 Descarga de imágenes satelitales

Para realizar la descarga de datos satelitales fue necesario llevar a cabo una detallada selección de imágenes del área de estudio, para diferentes temporalidades. Estas, fueron obtenidas a través de la plataforma Google Earth Engine (GEE), que presenta un catálogo de datos de teledetección e imágenes satelitales descargables a través de un código de programación en lenguaje JavaScript.

Las imágenes utilizadas son distribuidas por The European Space Agency (ESA) desde el instrumento multiespectral *Sentinel-2* (MSI), el cual está a bordo de los satélites Sentinel-2A y Sentinel-2B que orbitan la tierra a una altitud aproximada de 786 km (Martimort *et al.*, 2007).

Sentinel-2 está compuesto por 13 bandas, donde las distancias de muestreo varían entre 10 metros para bandas de infrarrojo visible cercano (NIR), 20 metros para el borde rojo, bandas NIR e infrarrojo de onda corta (SWIR) y 60 metros para las bandas atmosféricas, las cuales se especifican en la Tabla 2 (Claverie *et al.*, 2018). El programa Sentinel-2, proporciona una fuente de observaciones de parámetros relacionados con el comportamiento, es decir, la vegetación, fenología y valores asociados al contenido de humedad del área de estudio. Para efectos de esta investigación, se utilizaron imágenes proporcionadas por Sentinel- A, el proporciona imágenes cada 5 días.

Tabla 2. Descripción de bandas satelitales de Sentinel-2.

	S2A		S2B		
Número de banda	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Resolución espacial (m)
1	442,7	21	442,3	21	60
2	492,4	66	492,1	66	10
3	559,8	36	559,0	36	10
4	664,6	31	665,0	31	10
5	704,1	15	703,8	16	20
6	740,5	15	739,1	15	20
7	782,8	20	779,7	20	20
8	832,8	106	833,0	106	10
8a	864,7	21	864,0	22	20
9	945,1	20	943,2	21	60
10	1373,5	31	1376,9	30	60
11	1613,7	91	1610,4	94	20

Extraído de. (Copernicus, 2022)

En cuanto a la temporalidad de las imágenes, estas fueron seleccionadas según su cercanía con la fecha del muestreo, pero dadas las condiciones climáticas propias de la estación y la zona, es que se escogieron imágenes de meses estivales o con ausencia de nieve, lo que permitió observar el comportamiento de la vegetación con mayor certeza. Se seleccionó para descarga, imágenes que presentaran un nivel de corrección de nubosidad bajo el 15 %, dado que la presencia de nubes altera los valores de los píxeles de la imagen. Obteniendo una colección de imágenes para cinco años consecutivos (2018 a 2022) de 42 imágenes, a las que se les extrajo los valores de píxel para las 13 bandas satelitales y en cada punto de muestreo, obteniendo un total de 247 datos de análisis por imagen, los que fueron organizados en el Software Excel para realizar su posterior análisis.

5.4.2 Análisis de datos de imágenes satelitales en relación con fracciones de carbono

Los datos obtenidos de cada imagen multiespectral fueron analizados en conjunto con los datos de carbono obtenidos luego del análisis de laboratorio. Se realizaron múltiples correlaciones lineales de Pearson, las cuales indican la relación lineal entre dos variables (Dagnino J.,2014), para cada imagen mediante el Software XLStat, entre las bandas satelitales de cada imagen con la fracción de carbono contenida en cada píxel, con el fin de seleccionar aquella imagen y banda que presentaran la correlación con el mayor índice.

Una vez seleccionadas las mejores correlaciones, se aplicó una regresión lineal simple para llevar a cabo la extrapolación de datos en base al modelo matemático. El modelo se escogió en base a los valores del coeficiente de determinación (R^2),

siendo el criterio de elección, aquellos valores más altos, lo que significa un buen ajuste de los datos reales al modelo, pudiendo definir con gran exactitud los valores a calcular (IBM, 2023).

5.5 Extrapolación de datos y obtención de stock de carbono

Una vez obtenido el modelo matemático, se procedió a realizar una extrapolación en el Software ArcGIS. Allí se realizó una extracción por máscara en la imagen satelital seleccionada, únicamente de las turberas en estudio. Esta herramienta permite extraer las celdas de una imagen ráster y sus valores guiándose por una máscara, representada esquemáticamente en la Figura 8.

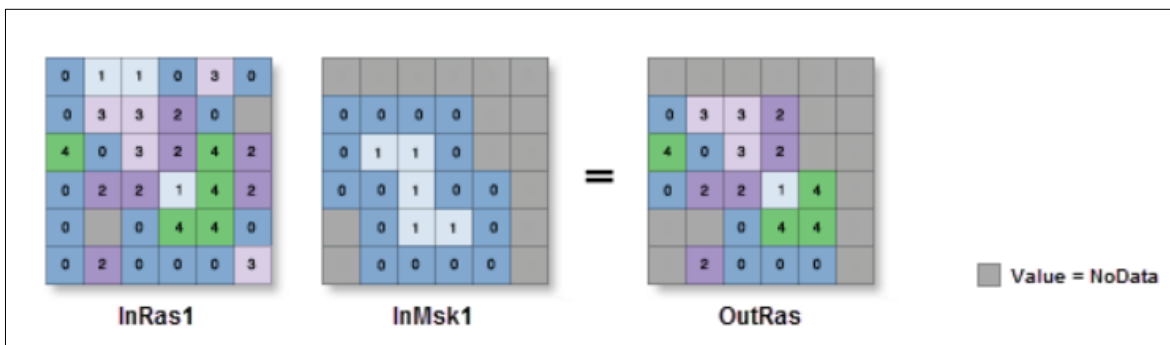


Figura 8. Representación ilustrada de herramienta de análisis espacial “Extraer por máscara”.

Fuente: Extraído de. (ESRI, 2022)

Dicha extracción entrega 13 imágenes ráster, una para cada banda, en donde sólo se utilizó la imagen correspondiente a la banda con mejor correlación. Posteriormente para realizar la extrapolación fue necesario aplicar la herramienta “Algebra de mapas” que permite realizar análisis geográficos de manera algebraica. Aquí, se aplicó la ecuación matemática obtenida por el modelo de regresión lineal,

obteniendo como resultado la extrapolación de datos para el área de estudio. La cuantificación del stock de carbono se visualiza a través de la herramienta de geoprocesamiento “Estadística zonal como tabla” que resume valores de una imagen ráster, en este caso, el stock de carbono total para el área de estudio.

6. RESULTADOS

6.1 Caracterización vegetacional

Para las turberas estudiadas, se reconocieron 26 especies, detalladas en la Tabla 3, en las cuales se identificaron un total de 16 especies nativas, nueve endémicas y una exótica. Además, se logró determinar seis hábitos de crecimiento; ocho pertenecientes a la categoría de hierba perenne, siete a liquen, siete a arbusto o subarbusto, tres a briofitas y una a árbol.

Tabla 3. Clasificación de la vegetación presente en las turberas estudiadas.

Clase	Familia	Especie	Origen
Bryopsida	Dicranaceae	<i>Campylopus acuminatus</i> Mitt.	Nativa
Bryopsida	Dicranaceae	<i>Dicranoloma billardierei</i>	Nativa
Bryopsida	Dicranaceae	<i>Dicranoloma imponens</i> (Mont.) <i>Renauld</i>	Nativa
Bryopsida	Sphagnaceae	<i>Sphagnum magellanicum</i>	Nativa
Eudicotyledoneae	Ranunculaceae	<i>Caltha appendiculata</i> Pers.	Nativa
Lecanoromycetes	Cladoniaceae	<i>Cladia aggregata</i> (Sw.) Nyl.	Nativa
Lecanoromycetes	Cladoniaceae	<i>Cladonia</i> sp.	Nativa
Lecanoromycetes	Cladoniaceae	<i>Cladonia arbuscula</i>	Nativa

Lecanoromycetes	Cladoniaceae	<i>Cladonia rangiferina</i> (L.) Weber ex F.H.Wigg.	Nativa
Lecanoromycetes	Parmeliaceae	<i>Hypotrachyna sinuosa</i> (Sm.) Hale	Nativa
Lecanoromycetes	Parmeliaceae	<i>Usnea</i> sp.	Nativa
Liliopsida	Asteliaceae	<i>Astelia pumila</i> (G.Forst.) Gaudich.	Endémica
Liliopsida	Cyperaceae	<i>Carex canescens</i> L.	Exótica
Liliopsida	Cyperaceae	<i>Carex magellanica</i> Lam.	Nativa
Liliopsida	Cyperaceae	<i>Oreobolus obtusangulus</i> Gaudich.	Nativa
Liliopsida	Cyperaceae	<i>Schoenus rhyngosporoides</i> (Steud.) Kük.	Endémica
Liliopsida	Juncaceae	<i>Juncus scheuchzerioides</i> Gaudich.	Nativa
Magnoliopsida	Asteraceae	<i>Baccharis linearis</i> (Ruiz & Pav.) Pers.	Endémica
Magnoliopsida	Asteraceae	<i>Baccharis patagonica</i> Hook. & Arn.	Endémica
Magnoliopsida	Escalloniaceae	<i>Escallonia serrata</i> Sm.	Endémica
Magnoliopsida	Ericaceae	<i>Gaultheria antarctica</i> Hook.f.	Endémica
Magnoliopsida	Ericaceae	<i>Empetrum rubrum</i> Vahl ex Willd.	Nativa
Magnoliopsida	Ericaceae	<i>Gaultheria mucronata</i> (L.f.) Hook. et Arn.	Endémica

Magnoliopsida	Myrtaceae	<i>"Myrteola nummularia (Poir.) O. Berg"</i>	Nativa
Magnoliopsida	Nothofagaceae	<i>Nothofagus antarctica (G.Forst.) Oerst.</i>	Endémica
Magnoliopsida	Santalaceae	<i>Nanodea muscosa Banks ex C.F.Gaertn.</i>	Endémica

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la abundancia vegetal, se logró identificar a cuatro especies con una presencia mayor al 60 % en los cuadrantes de muestreo, detallado en la Tabla 4.

Tabla 4. Especies más comunes en los puntos de muestreo.

Especie	% cobertura promedio
<i>Myrteola nummularia (Poir.) O. Berg"</i>	87,8
<i>Sphagnum magellanicum</i>	78,9
<i>Schoenus rhynchosporoides (Steud.) Kük.</i>	78,0
<i>Empetrum rubrum Vahl ex Willd.</i>	60,5
<i>Gaultheria antarctica Hook.f.</i>	46,4
<i>Baccharis patagonica Hook. & Arn.</i>	26,3
<i>Nothofagus antarctica (G.Forst.) Oerst.</i>	23,0
<i>Carex canescens L.</i>	21,1
<i>Cladia aggregata (Sw.) Nyl.</i>	14,5
<i>Oreobolus obtusangulus Gaudich.</i>	14,1

Fuente: Elaboración propia.

Además, se realizaron mediciones de altura para cada cuadrante, siendo la media para el área de estudio de 6,88 cm, donde la nieve y su espesor alteran estos parámetros. (Tabla Anexo 1).

6.2 Estimación del stock de carbono contenido en estratos superficiales y subterráneo

6.2.1 Secado de muestras

Para la toma de muestras, se realizó la división de estratos, obteniendo dos muestras por punto, una para el estrato superficial y otra para el subterráneo, a excepción del punto 19, que, dadas las condiciones de terreno, no se pudo extraer una muestra del estrato subterráneo. Finalmente se tomaron 37 muestras, que fueron trasladadas hasta el laboratorio, para realizar el proceso de secado a 70°C por 72 horas. Una vez que las muestras alcanzaron un peso seco estable, se calculó el porcentaje de humedad que estas contenían, correspondiendo a el 90% de su peso húmedo, a continuación, en la Tabla 5 se informan los pesos húmedos, secos, la cantidad de agua contenida en la muestra de turba en gramos y el porcentaje (%) de humedad para cada punto.

Tabla 5. Porcentaje de agua contenido en las muestras de turba analizadas.

Punto	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Agua contenida (g)	% de agua
1	2125,0	160,2	1964,8	92,5
2	1795,0	115,2	1679,8	93,6
3	10440,0	333,8	10106,2	96,8

4	2810,0	151,8	2658,2	94,6
5	2930,0	183,1	2746,9	93,8
6	2205,0	110,7	2094,3	95,0
7	3250,0	174,7	3075,3	94,6
8	3075,0	207,3	2867,7	93,3
9	1095,0	160,0	935,0	85,4
10	2615,0	144,1	2470,9	94,5
11	2655,0	153,4	2501,6	94,2
12	1580,0	129,1	1450,9	91,8
13	1510,0	105,2	1404,8	93,0
14	2600,0	240,2	2359,8	90,8
15	1315,0	146,1	1168,9	88,9
16	2260,0	197,5	2062,5	91,3
17	965,0	175,0	790,0	81,9
18	3305,0	291,5	3013,5	91,2
19	1205,0	27,1	1177,9	97,8

6.2.2 Obtención de la fracción de carbono

Posterior al proceso de secado, se realizó la incineración de muestras donde se obtuvieron los pesos para las submuestras de turba, presentados a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6. Pesos de las submuestras luego de ser incineradas en una muflla a 550°C.

Para el punto 19 se observa ausencia de submuestra para el estrato subterráneo.

Punto	Estrato superficial (submuestra incinerada en gramos)	Estrato subterráneo (submuestra incinerada en gramos)
1	0,1284	0,7822
2	0,0479	0,3227
3	0,1996	2,2635
4	0,0953	0,3527
5	0,0925	0,2206
6	0,0636	0,6574
7	0,7158	0,6224
8	0,3705	0,3672
9	0,0638	0,2162
10	0,0650	2,5203
11	0,0736	0,7681
12	0,0617	0,2605
13	0,0552	0,3622
14	0,4932	1,2405
15	0,0706	0,3427
16	0,2753	2,1259
17	0,1586	0,3715
18	0,3468	0,8274
19	0,0690	-

Para obtener las fracciones de carbono de las submuestras, se realizó una sustracción entre el peso seco de estas y el peso post quemado. Luego para obtener la cantidad de carbono para cada píxel, fue necesario realizar cálculos de proporciones entre las muestras pesadas en terreno y los pesos de las submuestras incineradas. Los resultados de las fracciones de carbono para cada estrato se indican a continuación en la Tabla 7.

Tabla 7. Cantidad de carbono contenido en cada punto en kg / m².

Punto	Carbono (kg/m²) estrato superficial	Carbono (kg/m²) estrato subterráneo	Carbono total (kg/m²)
1	0,161	13,045	13,206
2	0,196	7,676	7,872
3	0,843	9,951	10,794
4	0,214	11,408	11,621
5	0,256	14,286	14,543
6	0,208	6,232	6,440
7	0,380	6,998	7,378
8	0,387	12,437	12,824
9	0,306	10,036	10,342
10	0,257	6,542	6,799
11	0,403	5,414	5,817
12	0,311	6,034	6,344
13	0,237	5,280	5,516

14	0,376	14,045	14,421
15	0,268	9,209	9,477
16	0,330	9,669	9,999
17	0,394	8,628	9,022
18	0,693	11,577	12,270
19	0,104	-	0,104

Dado que se trabajó con imágenes multiespectrales para la extrapolación de datos, fue necesario conocer la cantidad de carbono existente en cada píxel para cada punto. De esta manera, en base a análisis de proporciones se calculó el carbono existente en cada píxel (400 m²), indicados a continuación en la Tabla 8.

Tabla 8. Cantidad de carbono en kilogramos contenida en el píxel donde se tomó la muestra.

Punto	Carbono(kg) / Píxel Superficial	Carbono(kg) / Píxel Subterráneo	Carbono(kg) / Píxel TOTAL
1	64,32	5217,97	5282,29
2	78,40	3070,47	3148,87
3	337,20	3980,24	4317,43
4	85,47	4563,02	4648,49
5	102,51	5714,52	5817,03
6	83,20	2492,69	2575,89
7	151,92	2799,12	2951,04
8	154,74	4974,75	5129,49

9	122,38	4014,55	4136,93
10	102,78	2616,94	2719,72
11	161,15	2165,79	2326,94
12	124,22	2413,56	2537,78
13	94,60	2111,84	2206,44
14	150,40	5617,83	5768,23
15	107,28	3683,44	3790,72
16	131,84	3867,74	3999,58
17	157,59	3451,37	3608,96
18	277,39	4630,79	4908,18
19	41,46	-	41,46

6.3 Cuantificar el stock de carbono a través de datos satelitales

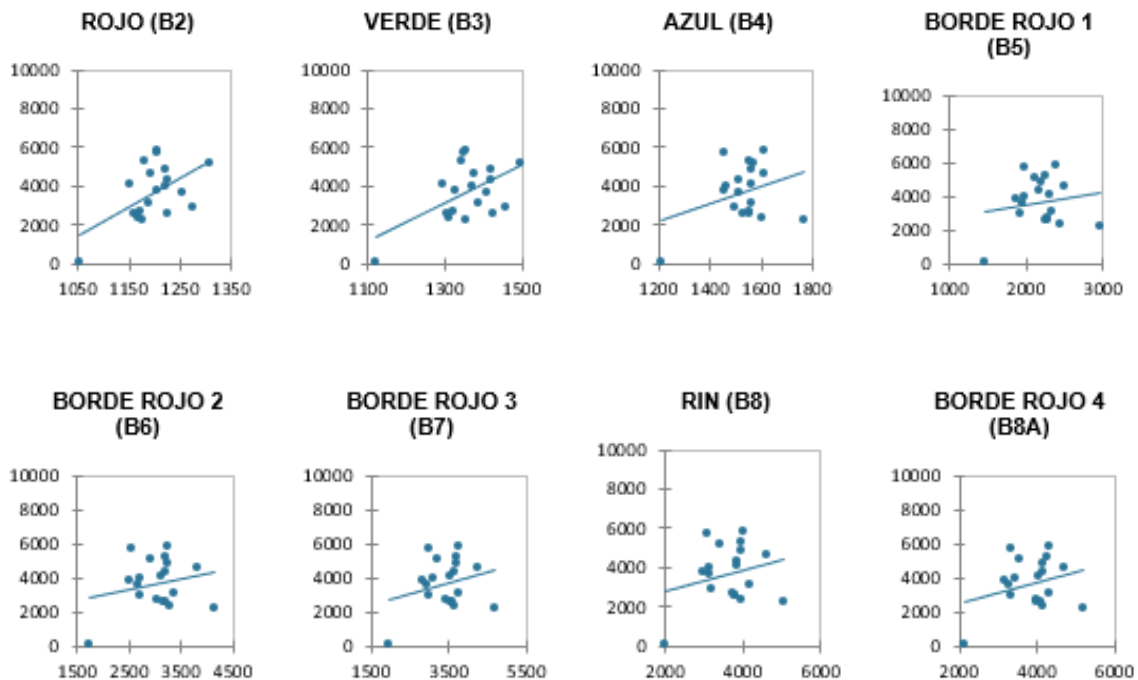
6.3.1 Descarga de imágenes satelitales

Se descargaron imágenes multiespectrales, desde Sentinel 2, todas con un nivel de cobertura de nubes menor al 10% para diferentes temporalidades, específicamente meses estivales, donde no había presencia de nieve. El análisis se realizó con 47 imágenes desde el año 2018 a 2022, siendo las ideales, aquellas que fueron generadas en días cercanos al muestreo, las fechas de las imágenes se encuentran detalladas en la Tabla Anexo 2.

6.3.2 Análisis de datos de imágenes satelitales en relación con fracciones de carbono

Se dispusieron los valores del píxel asociado a cada punto de muestreo y para cada banda satelital en el software Microsoft Excel. Esto se replicó para cada imagen, tal como lo indican las Figuras Anexo 1 y 2.

Se realizaron múltiples correlaciones entre los valores de carbono y valores de píxel de cada banda, para cada imagen mensual disponible y también para promedios anuales, se obtuvieron los siguientes resultados.



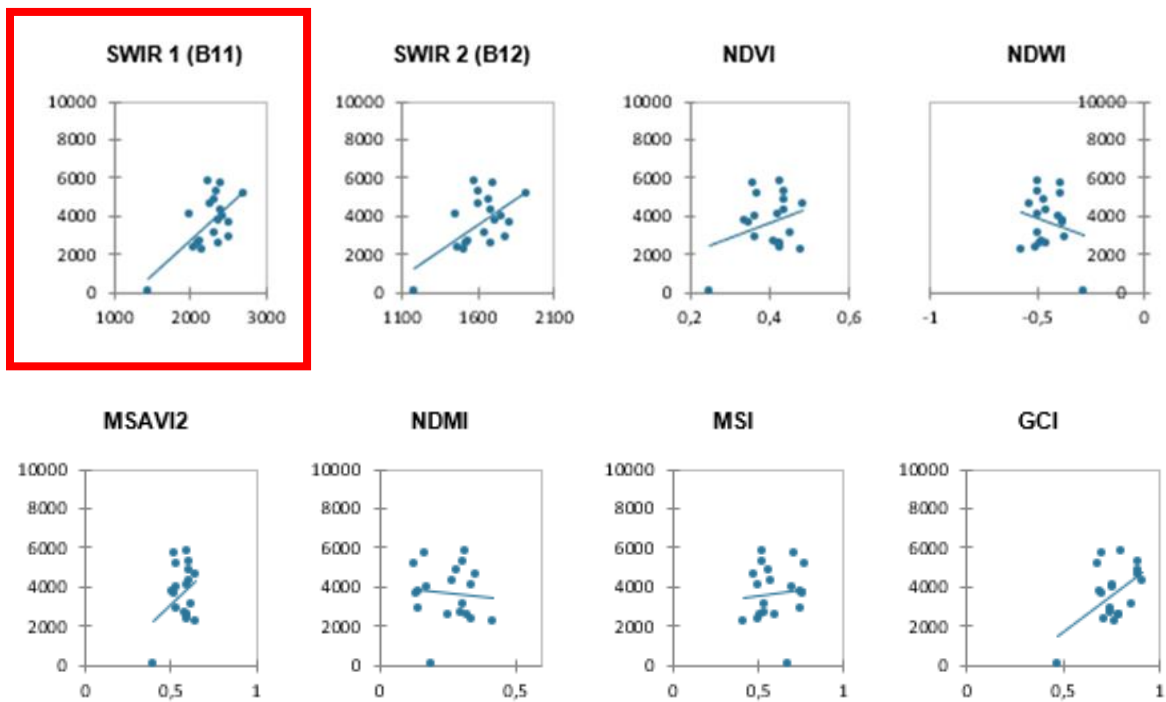


Figura 9. Correlaciones de Pearson con la imagen que resultó tener mejor coeficiente de correlación y ser la más cercana a la fecha de muestreo. Data del 11 de marzo de 2022. El recuadro rojo indica el mejor coeficiente de correlación.

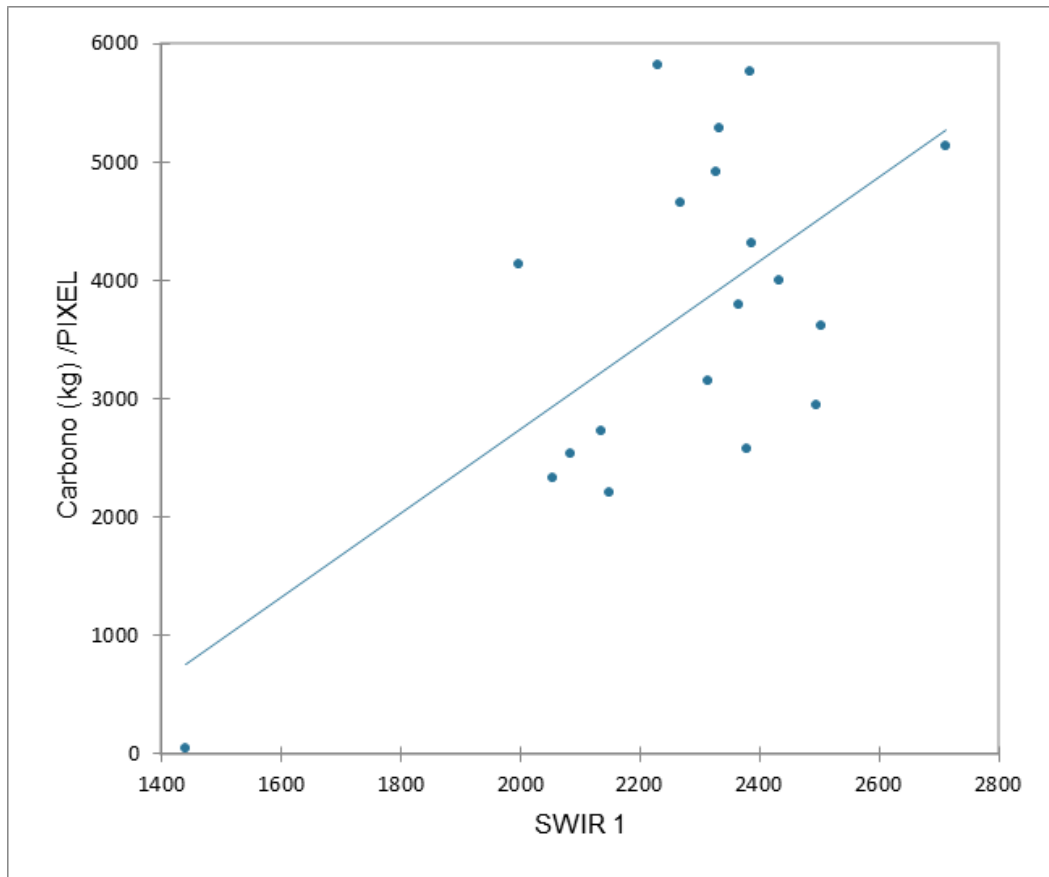


Figura 10. Mejor correlación entre cantidad de carbono por píxel y banda satelital infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1).

Posteriormente se realizó una regresión lineal simple, donde se obtuvo el modelo que permitió la extrapolación de datos.

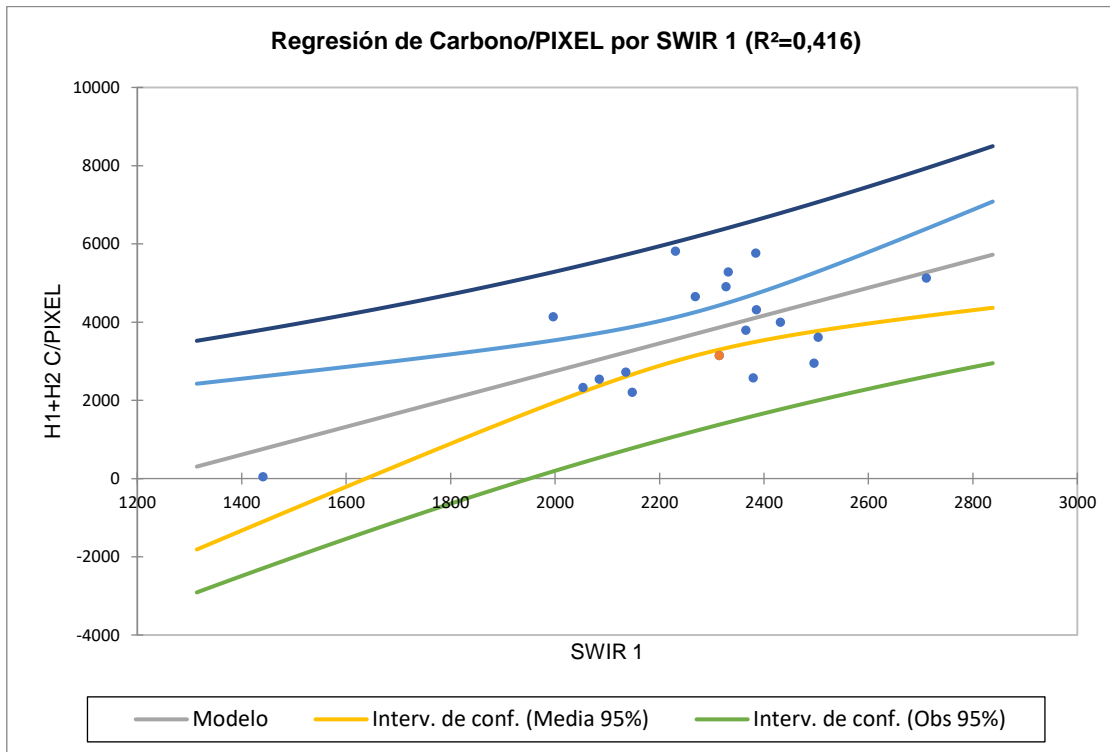


Figura 11. Gráfica representativa de análisis de regresión lineal y el ajuste de los datos al modelo.

El modelo obtenido resultó ser el siguiente, con un coeficiente de determinación R²=0,416.

$$\text{Modelo Carbono / Píxel} = - 4365,1423 + 3,5550 * \text{SWIR 1}$$

6.3.3 Extrapolación de datos y obtención de stock de carbono

La extrapolación de datos se realizó en el software de análisis espacial ArcGIS, donde, la primera parte consistió en la separación de la imagen multiespectral en sus 13 bandas y la delimitación sólo al área de estudio. Obteniendo por resultado, lo indicado en la Figura 12.



Figura 12. Área de estudio luego de aplicar herramienta “Extracción por máscara” para limitar el cálculo de carbono sólo a los píxeles correctos.

Mediante la herramienta “Algebra de mapas” se aplicó la ecuación del modelo, dando como resultado un total de 2.312,5 ton/m² de carbono para la totalidad del área. Las cantidades específicas para cada turbera están indicadas en la Figura 13.

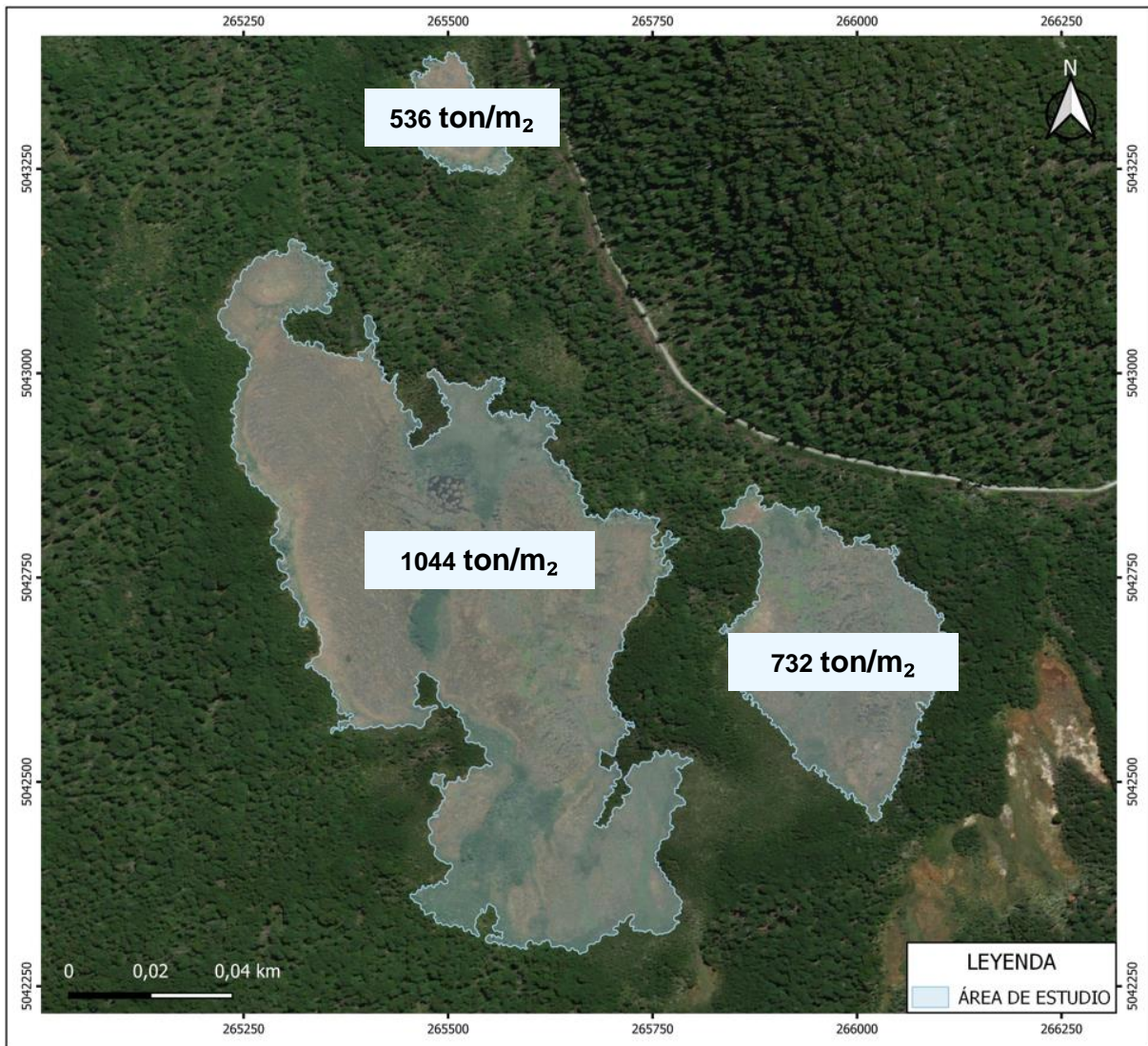


Figura 13. Estimación de stock de carbono contenido en cada área de la turbera.

7. DISCUSIÓN

Estimar el stock de carbono en una turbera, supone un gran desafío, puesto que cada ecosistema es único, en este sentido, existen múltiples variables que considerar para cada turbera. Por esto, fue necesario analizar cada componente, desde lo superficial hasta lo interior, aprendiendo a la vez, el dinamismo de este ecosistema.

La caracterización de la vegetación presente en la turbera se realizó en condiciones extremas, a pesar de ello, se observaron resultados fiables y que resultan ser comparables con la literatura existente sobre composición florística de turberas en la región de Aysén. A pesar de que un muestreo vegetacional en condiciones de gran presencia de nieve implica la pérdida del florecimiento y la propagación en total libertad de la flora presente, se logró identificar 26 especies, que suelen ser aquellas que caracterizan y predominan a las turberas de la Patagonia, por lo que se deduce que un muestreo en invierno sólo veda el estudio de algunas especies en singular y que pueden ser poco predominantes en estos ecosistemas, pero no menos importantes.

El muestreo consideró en su mayoría la identificación de especies de tipo briofitas, líquenes y en gran abundancia, vasculares, ya que estas suelen tener mayor presencia en turberas y además permiten ser identificadas de manera más sencilla, correspondiendo para este estudio al 62% de las especies encontradas. También es importante señalar que, si bien la turbera en estudio es considerada en la literatura más bien homogénea en cuanto a vegetación, esta presentó especies bastante variables en cuanto a las definiciones de la clasificación para los diferentes tipos de turbera según la vegetación, ya que se encontró vegetación

correspondiente en su mayoría a turberas de *Sphagnum*, pero también se evidenció la presencia de vegetación característica en turberas de tipo pulvinadas, es decir, especies donde domina el crecimiento de vegetación en forma de cojín con gran firmeza y densidad como *Astelia Pumilia* y *Oreobolus obtusangulus* (Villarroel *et al.*, 2021). Se podría inferir que esta turbera se ajuste a la definición de Domínguez *et al.*, 2021 sobre “Turbera mixta de *Sphagnum* y pulvinada no intervenida” sin embargo, resulta ser que, esta, si es una turbera intervenida. Lo que se develó en el hallazgo de la presencia de sacos a orillas del camino, que en su interior contenían musgo *Sphagnum*. Este hallazgo nos lleva a entender también la presencia de la gramínea *Carex* en algunos puntos de muestreo. Pasto que suele ser característico de sitios en donde ha existido extracción y perturbación del medio (Domínguez *et al.*, 2021).

En cuanto a los hábitos de crecimiento en su mayoría resultaron ser epífitas, característica prevista, ya que dadas las condiciones no era posible el crecimiento de vegetación alta, producto de lo mismo, fue que se identificaron tan solo 5 especies de tipo arbórea/arbustiva y 8 pertenecientes a la clasificación de hierba perenne. El origen biogeográfico de las especies identificadas corresponde en su mayoría a especies nativas, las cuales representan el 61,5% del total de especies, 34,6% son endémicas y 3,8% introducidas, lo que evidencia el gran valor de este ecosistema en cuanto a su conformación en flora nativa.

Por otra parte, los análisis de laboratorio permitieron efectuar mediciones de parámetros fisicoquímicos, en este caso, el foco se centró en el carbono contenido, donde dada la composición de las muestras, fue necesario aplicar una metodología para materia orgánica. Tratándose de un secado en horno para luego incinerar la

muestra, metodología conocida como Loss On-Ignition (LOI) donde la diferencia entre el peso seco y el peso incinerado es lo que nos entregó la cantidad de materia orgánica y, por consiguiente, el Carbono que contenía cada muestra. Esta metodología resulta ser bastante fiable cuando se trata de un análisis de estimación, y que considere pocas muestras, puesto que a la vez resulta ser extenso dada la cantidad de tiempo necesaria para los procesos de secado e incinerado. En cuanto a los resultados obtenidos, se evidencia que la mayor parte del Carbono está contenida en el estrato subsuperficial, el cual contiene 28,1 veces más Carbono que el estrato superficial, entregando certezas sobre la metodología utilizada, puesto que este resultado señala que el carbono está contenido hacia el núcleo de las turberas, donde se encuentra la acumulación de materia orgánica en descomposición desde hace años, sin dejar de mencionar la evidencia respecto al gran reservorio de Carbono que representan estos ecosistemas.

También, fue esencial realizar el secado de las muestras previo a la incineración, puesto que el alcanzar una estabilidad en su peso, permitió obtener la fracción de agua que contenía cada muestra. El peso de la vegetación corresponde sólo al 10%, siendo un indicador de la gran reserva de agua dulce que conforman las turberas. Comparando este resultado con el estudio de *Proyecto de turberas de Kalimantan Central, 2008* sobre “*Datos sobre la degradación de las turberas en el Sudeste Asiático*” es que se infiere que estos ecosistemas a pesar de estar ubicados en diferentes extremos del planeta suelen tener una dinámica similar, ya que los porcentajes de su contenido de agua de igual manera resultan ser el 90% de su peso tal como menciona el texto citado, análogamente, con su composición florística.

Este comportamiento similar, ha decantado en que las técnicas de estudio que se han utilizado alrededor del mundo a través del tiempo para el análisis de turberas y sus características sigan ramas similares, pudiendo experimentar en variaciones y fusiones metodológicas que llevan a relacionar datos de laboratorio con datos satelitales, específicamente sobre la reflectancia, es decir, análisis sobre los niveles espectrales de las turberas, logrando establecer modelos que correlacione ambas variables.

El uso de imágenes satelitales para los fines de esta investigación evidenció resultados positivos, considerando que las correlaciones de Pearson entre datos de carbono por píxel y las diferentes bandas satelitales indicaron valores de coeficiente por sobre 0,5 develando la relación lineal entre el carbono calculado y el comportamiento reflejado en los niveles espectrales. Específicamente, la banda de infrarrojo de onda corta SWIR 1 que mostró la mejor correlación, representa gran aplicabilidad en el estudio de la vegetación, puesto que es sensible a los niveles de humedad de esta, siendo una característica determinante en las turberas.

Si bien el resultado final obtenido de 2.312,5 ton/m² para la totalidad del área de estudio y específicamente 14,5 kg C/m², logra ser comparable con la literatura existente, como el estudio de Cabezas, J en 2015 que señala $11,98 \pm 0,76$ kg C/m² sobre los “Efectos del manejo en los reservorios de carbono y la vegetación de una turbera antropogénica de la Isla Grande de Chiloé, Chile” y que utilizó una metodología similar en cuanto al cálculo de carbono para materia orgánica por micrositio y manejo de imágenes satelitales, también existen estudios de estimaciones de stock de carbono que han incorporado variables más complejas como radio ¹⁴C para relacionar la edad de acumulación de materia orgánica de las

turberas, la cantidad de carbono y la profundidad del núcleo analizado como Julie Loisel y Zicheng Yu en 2013 en su estudio titulado “*Holocene peatland carbon dynamics in Patagonia*” que indicó que el valor promedio acumulado en las turberas es de 168 Kg C/m², son evidencia de que en la actualidad las turberas aún son un ecosistema desafiante y que invitan a comprender su dinamismo a través del tiempo.

El uso de recursos satelitales, específicamente imágenes multiespectrales, es una herramienta que presenta gran potencial y aplicabilidad para estudiar turberas, ya que entrega información fidedigna respecto a variables críticas, como la humedad y contenido de biomasa (mediante la absorción de clorofila), permitiendo el análisis del comportamiento en tiempo real o tiempo pasado. En este sentido, la disponibilidad de imágenes de semanas a años anteriores fue crucial, puesto que la campaña de terreno se realizó en invierno y en abundancia de nieve, siendo para los efectos del estudio de reflectancia una limitante, ya que la vegetación se encontraba cubierta. Por lo que las imágenes multiespectrales representan un componente fundamental y una puerta al estudio en múltiples variables de estos ecosistemas.

Esta investigación da cuenta del protagonismo que representan las turberas en cuanto al cambio climático, apremiando su cuidado y protección de la actividad antropogénica, dando pie a nuevas líneas de investigación que vayan en pro del entendimiento y valoración de sus singulares características.

8. CONCLUSIONES

Este estudio caracterizó la composición vegetacional para una turbera nor-patagónica de alta montaña en la región de Aysén, identificando un total de 26 especies en su mayoría epífitas y con un alto grado de endemismo, dando cuenta de la limitada intervención antrópica que esta presenta.

A través del análisis de la materia orgánica recolectada en terreno, se evidenció la cantidad de agua que absorben las turberas (90% de su peso), sosteniendo la idea de que son uno de los principales reservorios de agua dulce del planeta. También se obtuvo una fracción de carbono de 14,5 kg C/m² siendo este, el valor más alto de las muestras analizadas.

Para un área de 32,18 has se estimó un stock de carbono de 2.312,5 ton/m² lo que resulta ser comparable con la literatura, validando a la vez la metodología utilizada. En base a esto, es que se confirma que, bajo un mal manejo, las turberas pueden ser una contribución persistente de CO₂ a la atmosfera, precisando el cuidado de estas, buscando evitar su explotación indiscriminada.

El uso de la teledetección en el análisis de ecosistemas evidencia una correlación positiva entre el comportamiento de la vegetación y el suelo, con los datos de laboratorio obtenidos. Siendo esta relación una línea de investigación por abordar en el campo del estudio de turberas.

Es importante señalar que estudiar un ecosistema en condiciones invernales, presenta limitaciones en la disponibilidad de datos y análisis Vegetacionales, puesto que la nieve cubre el manto vivo, siendo fundamental el estudio de literatura, el

manejo de imágenes multiespectrales y una correcta planificación en la toma de muestras.

Esta investigación, es una de las pioneras al estimar stock de carbono en una turbera en la región de Aysén, buscando ser una motivación para futuros estudios que contribuyan a la preservación y cuidado de ecosistemas patagónicos.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Armesto, J. J., C. Villagrán & Donoso, C. (1994). Desde la era glacial a la industrial: La historia del bosque templado chileno. *Revista Ambiente y Desarrollo* 10: 66-72.
- Biblioteca Del Congreso Nacional. (2021). Lago Verde. Reporte comunal. https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2021&idcom=11102
- Biblioteca Del Congreso Nacional. (2023). Aysén. Reporte comunal. https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2023&idcom=11201
- Blanco, D. E. (1999). Los humedales como hábitat de aves acuáticas. *Tópicos sobre humedales subtropicales y templados de Sudamérica*, 2, 219-228.
- Blanco, D. E. y V. M. de la Balze (eds.). (2004). *Los Turbales de la Patagonia: Bases para su inventario y la conservación de su biodiversidad*. Publicación No. 19. Wetlands International. Buenos Aires, Argentina.
- Cabezas Peña, J. (2015). Efectos del manejo en los reservorios de carbono y la vegetación de una turbera antropogénica en la Isla Grande de Chiloé, Chile.
- Castillo Riffart, I. (2017). Predicción de la riqueza de plantas vasculares y carbono aéreo de turberas antropogénicas: comparación de dos métodos de modelación con tres sensores remotos de uso libre.
- Charman, D. (2002). *Peatlands and environmental change*. J. Wiley & Sons, London & New York, 301 p.
- CKPP (2008). *Questions & Answers: Facts about peatland degradation in Southeast Asia in a global perspective*. (CKPP). Wetlands International. Wageningen.
- Claverie, M., Ju, J., Masek, JG, Dungan, JL, Vermote, EF, Roger, JC, ... y Justice, C. (2018). El conjunto de datos de reflectancia superficial armonizados Landsat y Sentinel-2. *Teledetección del medio ambiente*, 219, 145-161.
- Clymo, R. S. & P. M. HAYWARD (1982). The ecology of Sphagnum. En: A. J. E. Smith (ed.), *Bryophyte Ecology*, pp. 229-290. Chapman & Hall. London-New York.
- Clymo, R. S. (1996). Assessing the accumulation of carbon in peatlands. *Northern peatlands in global climate change*, 207-212.
- Clymo, R. S., J. TURUNEN & K. TOLONEN (1998). Carbon accumulation in peatland. *Oikos* 81: 368-388.
- Copernicus. S2 Mission. (2022). En Copernicus: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission>

- CONAF, Corporación Nacional Forestal. (2013). Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales de Chile.
- Dagnino, J. (2014). Coeficiente de correlación lineal de Pearson. *Chil Anest*, 43(1), 150-153.
- Díaz, M. F., Larraín, J., & Zegers, G. (2005). Guía para el conocimiento de la flora de turberas y pomponales de la Isla Grande de Chiloé.
- Díaz, M. F., Larraín, J., Zegers, G., & Tapia, C. (2008). Caracterización florística e hidrológica de turberas de la Isla Grande de Chiloé, Chile. *Revista chilena de historia natural*, 81(4), 455-468.
- Eula. (2021). Inventario de Turberas de la Región de Los Lagos. Informe consolidado. 94 pp.
- Erwin Domínguez & Fernán Silva. (2021). Flora y vegetación de turberas de Sphagnum en la región de Aysén, Chile. Cap. 8 p. 193 - 231. En: E. Domínguez y M.P. Martínez (eds.). *Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas de Sphagnum en la región de Aysén*. Colección libros INIA N° 41. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Tamel Aike, Chile. Coyhaique, 344 pp
- ESRI. Spatial Analyst. (2022). En ArcGis Pro: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/extract-by-mask.htm>
- Hauser, A. (1996). Los depositos de turba en Chile y sus perspectivas de utilizacion. *Revista Geológica de Chile* 23 (2): 217-229.
- Henríquez, P. (2021). MAPEO DE TURBERAS NATURALES Y ANTROPOGÉNICAS EN LA COMUNA DE CHONCHI DE LA REGIÓN DE LOS LAGOS, MEDIANTE TÉCNICA DE PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).
- Hoyos-Santillan J & Mansilla C.A. (2021). Dinámica del carbono en turberas de la Patagonia chilena. Cap. 3 p. 65 - 89. En: E. Domínguez y M.P. Martínez (eds.). *Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas de Sphagnum en la región de Aysén*. Colección libros INIA N° 41. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Tamel Aike, Chile. Coyhaique, 344 pp.
- IBM. Cognos analytics. (2023). En IBM: <https://www.ibm.com/docs/es/cognos-analytics/11.1.0?topic=terms-r2>
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). (2020). Principales modificaciones contenidas en la última versión vigente del Decreto Supremo N°25 que regula la cosecha del musgo Sphagnum. Informativo N°48.

- Instituto Forestal (INFOR). (2021). Productos Forestales no madereros. Boletín N°37.ISSN 0719.9996.
- Instituto Forestal (INFOR). (2022).Productos Forestales no madereros. Boletín N°40.ISSN 0719.9996.
- Iturraspe, R. (2010). Las turberas de Tierra del Fuego y el cambio climático global. Fundación Humedales-Wetlands International.
- Iturraspe R & C Roing (2000) Aspectos hidrológicos de turberas de Sphagnum de Tierra del Fuego -Argentina. En: Coronato A & C Roig (eds) Conservación de ecosistemas a nivel mundial con énfasis en las turberas de Tierra del Fuego. Disertaciones y Conclusiones: 85-93. Ushuaia, Argentina.
- Joosten, H., Couwenberg, J. (2008). Peatlands and carbon, in: Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M., Stringer, L. (Eds.), Assessment on peatlands, biodiversity and climate change: main report Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen, pp: 99-117.
- Leifeld, J., Wüst-Galley, C. & Page, S. (2019). Intact and managed peatland soils as a source and sink of GHGs from 1850 to 2100. Nat. Clim. Chang. 9, 945–947 <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0615-5>
- León, C., Oliván, G., Fuertes, E. (2012). Turberas esfangósas de Chiloé (Chile) y su problemática ambiental. Bol. Soc. Esp. Briol. 38-39: 29-40.
- León, Juan Diego, González, María Isabel y Gallardo, Juan Fernando. (2011). Ciclos biogeoquímicos en bosques naturales y plantaciones de coníferas en ecosistemas de alta montaña de Colombia. Revista de Biología Tropical, 59 (4), 1883-1894.
- León, C.A., Oliván, G. (2014). Recent rates of carbon and nitrogen accumulation in peatlands of Isla Grande de Chiloé - Chile. Revista Chilena de Historia Natural, 87, 26, 7 pp.
- León, CA, Benitez-Mora, A. y Oliván, G. (2018). Actualización de las tasas recientes de acumulación de carbono en las turberas de la Patagonia Norte-Chile. Revista de ciencia del suelo y nutrición vegetal, 18 (4), 977-988.
- León, C. A., Gabriel, M., Rodríguez, C., Iturraspe, R., Savoretti, A., Pancotto, V., Benítez-Mora, A., Valdés, A., Díaz, M. F., Oberpaur, C., Domínguez, E., Fernández, L. D., Mackenzie, R., Roland, T., Mauquoy, D., & Silva, C. (2021). Peatlands of southern south america: A review. Mires and Peat, 27, 1-29. [3]. <https://doi.org/10.19189/MaP.2020.SNPG.StA.2021>
- Loisel, J, Yu Z. (2013). Holocene peatland carbon dynamics in Patagonia, Quaternary Science Reviews. Vol. 69. Pp 125-141.ISSN 0277-3791.<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.02.023>.

- Lu, D. (2006). The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing* 27:1297–1328.
- Martimort, P., Arino, O., Berger, M., Biasutti, R., Carnicero, B., Del Bello, U. & Sy, O. (2007). Sentinel-2 optical high resolution mission for GMES operational services. In 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 2677-2680). IEEE.
- Martín Chivelet, Javier. (2010). Ciclo del carbono y clima: la perspectiva geológica. *Enseñanza de las ciencias de la tierra*, 18 (1). pp. 33-46. ISSN 1132-9157
- Olivares Rojas, J. P. (2017). Evaluación del modelo ECOSSE para la simulación de flujos de gases de metano y dióxido de carbono en suelos de un bosque y una turbera antropogénica en la Isla de Chiloé.
- Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silviu, M. and Stringer, L. (Eds.). (2008). *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen.
- Pérez, C., & Muñoz, A. L. (2006). *Teledetección: nociones y aplicaciones*.
- Ramsar (2004) *Lineamientos para la acción mundial sobre las turberas (Guidelines for Global Action on Peatlands)*. Manual 14, Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, Secretariat of the Ramsar Convention, Gland, Switzerland, 15 pp. (in Spanish).
- Ramírez, Carlos, San Martín, Cristina, Vidal, Osvaldo, Pérez, Yéssica, Valenzuela, Jorge, Solís, José-Luis, & Toledo, Gisela. (2014). Subantarctic Tundra in Chiloé Island, Chile: Flora and vegetation of "Campañas" peat bogs. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 42(2), 17-37. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-686X2014000200002>
- Ruthsatz B & Villagrán C. (1991). Vegetation pattern and soil nutrients of a Magellanic moorland on the Cordillera de Piuchué, Chiloé Island, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 64: 461-478.
- Salinas Sanhueza J, Gómez Nome C & Poblete Hernández P. (2021). El mercado del musgo Sphagnum y su importancia como un PFNM en las comunidades rurales de la región de Aysén. Cap. 11 p. 275 - 295. En: E. Domínguez y M.P. Martínez (eds.). *Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas de Sphagnum en la región de Aysén*. Colección libros INIA N° 41. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Tamel Aike, Chile. Coyhaique, 344 pp.
- Schlatter RP & JE Schlatter. (2004). Los turbales de Chile. En: Blanco DE & VM Balze (eds) *Los Turbales de la Patagonia. Bases para su inventario y la conservación de su biodiversidad*, Publicación No. 19: 75-80. Wetlands International - América del Sur, Buenos Aires, Argentina.

Schofield, W. B. (1985). Introduction to Bryology. The Blackburn Press. Caldwell, New Jersey.

Vargas Linde, Carla (2013). Desarrollo de un plan de negocios del musgo pompón (*Sphagnum magellanicum*) para exportación extraído de humedales en la Región de Los Lagos. Universidad Austral de Chile.

Dagoberto Villarroel, José Manuel Henríquez, Erwin Domínguez, Fernán Silva, María Paz Martínez & John Báez. (2021). Distribución geográfica de turberas de *Sphagnum* en la región de Aysén. Cap. 1 p. 21 - 47. En: E. Domínguez y M.P.

10. ANEXOS

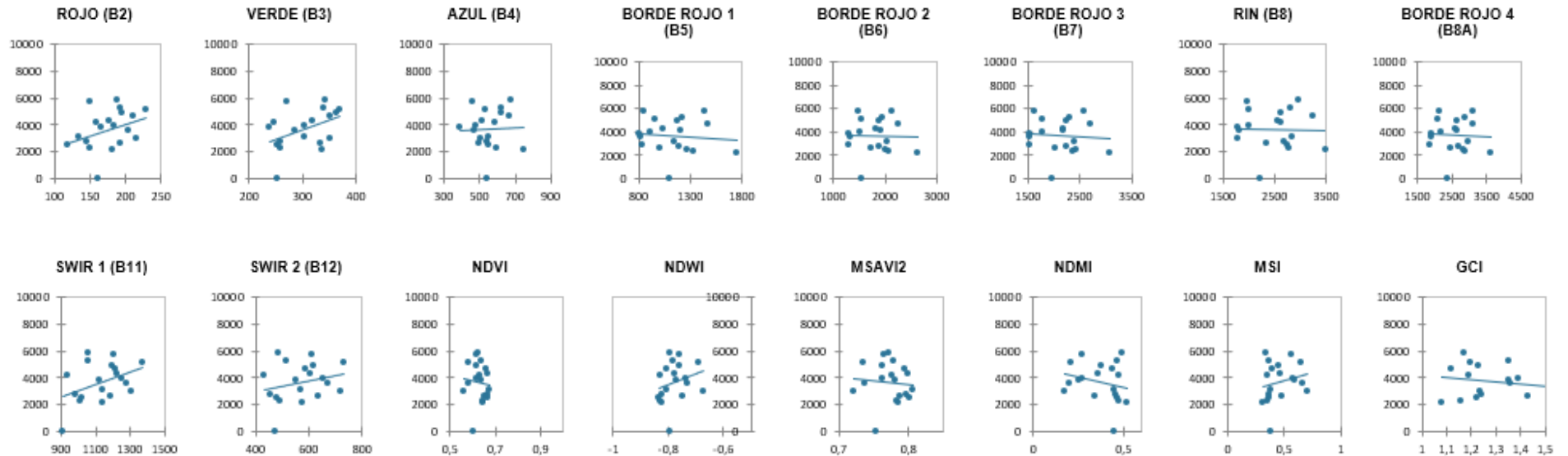
Tabla Anexo 1. Alturas medidas en cada punto del cuadrante de muestreo y su respectivo promedio.

Punto	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8	h9	PROMEDIO (cm)
1	0	0	7,5	0	0	0	0	0	0	0,833
2	10	0	0	0	0	9	4	0	7	3,333
3	0	11	0	0	0	0	0	0	0	1,222
4	0	0	7	12	0	9	6,5	0	7	4,611
5	8	0	0	0	0	0	0	0	13	2,333
6	0	0	0	9	53	5	0	8	0	8,333
7	0	0	0	0	0	0	0	0	23	2,556
8	0	0	10	0	25	0	0	0	0	3,889
9	10,5	5	20	7	11	0	7	13	6	8,833
10	11	6	7	0	3	0	10	10	9	6,222
11	4	7	0	20	10	5	0	12	15	8,111
12	7	10	0	0	3	0	9	12	9	5,556
13	0	0	0	0	0	23	15	7	8	5,889
14	0	16	0	0	80	25	0	0	77	22,000
15	47	35	42	11	0	0	0	0	0	15,000
16	0	83	0	0	81	32	0	0	5	22,333
17	0	13	0	4	0	0	8	0	0	2,778
18	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0,222
19	14	9	0	8	6	7	2	0	15	6,778
									\bar{X}	6,886

Tabla Anexo 2. Fecha de imágenes descargadas y analizadas.

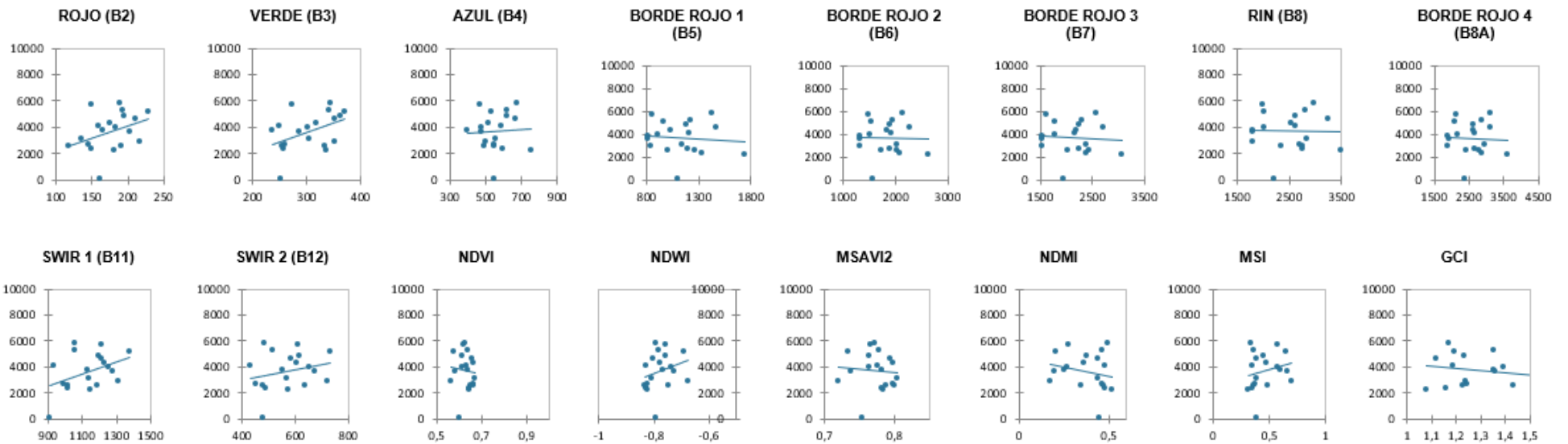
Fecha imagen	Fecha imagen
05-01-2022	01-01-2020
25-01-2022	16-01-2020
14-02-2022	21-01-2020
01-03-2022	26-01-2020
11-03-2022	20-02-2020
26-03-2022	01-03-2020
05-04-2022	31-03-2020
10-04-2022	30-04-2020
15-05-2022	05-05-2020
20-04-2022	30-05-2020
30-04-2022	19-06-2020
10-05-2022	21-06-2020
15-05-2022	07-09-2020
30-05-2022	22-10-2020
09-06-2022	06-11-2020
19-06-2022	06-12-2020
05-01-2021	26-01-2019
30-01-2021	15-02-2019
14-02-2021	27-03-2019
16-03-2021	06-05-2019
21-03-2021	15-06-2019
25-04-2021	17-12-2018
05-05-2021	
10-05-2021	
15-05-2021	
14-06-2021	
14-07-2021	
08-08-2021	
13-08-2021	
07-09-2021	
07-10-2021	
06-11-2021	
07-12-2021	

Imagen Anexo 1. Correlación de Pearson con datos de la imagen más cercana al muestreo y sus respectivos coeficientes de correlación. 15 de mayo de 2022.



ROJO (B2)	VERDE (B3)	AZUL (B4)	BORDE ROJO 1 (B5)	BORDE ROJO 2 (B6)	BORDE ROJO 3 (B7)	RIN (B8)	BORDE ROJO 4 (B8A)	SWIR 1 (B11)	SWIR 2 (B12)	NDVI	NDWI	MSAVI2	NDMI	MSI	GCI
0,359	0,430	0,046	-0,104	-0,033	-0,072	-0,020	-0,050	0,419	0,244	-0,087	0,270	-0,083	-0,222	0,212	-0,176

Imagen Anexo 2. Correlación de Pearson con datos de la segunda imagen más cercana al muestreo y sus respectivos coeficientes de correlación. 10 de mayo de 2022.



ROJO (B2)	VERDE (B3)	AZUL (B4)	BORDE ROJO 1 (B5)	BORDE ROJO 2 (B6)	BORDE ROJO 3 (B7)	RIN (B8)	BORDE ROJO 4 (B8A)	SWIR 1 (B11)	SWIR 2 (B12)	NDVI	NDWI	MSAVI2	NDMI	MSI	GCI
0,359	0,430	0,046	-0,104	-0,033	-0,072	-0,020	-0,050	0,419	0,244	-0,087	0,270	-0,083	-0,222	0,212	-0,176