

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y

RECURSOS NATURALES



Tesis

Captura de carbono por vegetación hidrofílica y suelos en la laguna de Urcos,

Quispicanchis, 2024

Asesor:

M.Sc. Pozo Gonzales, José Salustio

Autores:

Ccolque Lope, Claudia

Landio Velarde, Juan Hector

Para optar al Título Profesional de:

Ingeniero(a) Ambiental

Cusco - Cusco - Perú

2025



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES
"Año de la Recuperación y Consolidación de la Economía Peruana"

Acta N°: 012

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Cusco, a los 19 días del mes de noviembre del año 2025, siendo las 11:00 horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Sub Directoral N° 164-2025-UTEA-FI-EPIARN-SD de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales, Facultad de Ingeniería

Presidente :	Mg. Hanco Loayza Helidia
Dictaminante :	Mg. Mollo Varillas Valex Raúl
Replicante :	Mg. Sánchez Valenzuela Graciela

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

☒ Tesis ☐ Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Captura de carbono por vegetación hidrofílica y suelos en la laguna de Urcos, Quispicanchis, 2024

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Bach: Ccolque Lope, Claudia

Bach. Landio Velarde, Juan Hector

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero (a) Ambiental

Concluido el acto de Sustentación, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO (S):

Por: Unanimidad

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Bach: Ccolque Lope, Claudia	Aprobado Notable
Bach. Landio Velarde, Juan Hector	Aprobado Notable

Siendo las 12:50 pm horas concluyó el Acto Académico, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mg. Hanco Loayza Helidia

Dictaminante: Mg. Mollo Varillas Valex Raúl

Replicante: Mg. Sánchez Valenzuela Graciela

(*) Mayoría: Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; Unanimidad: Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban, Art. 18 RGGAT.

(**) 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

11% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 9%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 8%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Metadatos

Datos del Autor		
Apellidos y Nombres:	:	Ccolque Lope, Claudia
Tipo de Documento de Identidad:	:	DNI
Número de Documento de Identidad:	:	72783967
Url orcid:	:	
Apellidos y Nombres:	:	Landio Velarde, Juan Hector
Tipo de Documento de Identidad:	:	DNI
Número de Documento de Identidad:	:	73312273
Url ORCID:	:	
Datos del Asesor		
Apellidos y Nombres	:	M.Sc. Pozo Gonzales, José Salustio
Tipo De Documento De Identidad:	:	DNI
Número De Documento De Identidad:	:	23964591
Url ORCID:	:	https://orcid.org/0000-0002-4560-0072
Datos de la Investigación		
Facultad:	:	Ingeniería
Escuela profesional:	:	Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales
Línea de investigación:	:	Calidad Ambiental
Rango de años en que se realizó la investigación	:	Noviembre 2024 – noviembre 2025
Fuente de financiamiento:	:	Autofinanciado
Porcentaje de similitud	:	11%
URL OCDE	:	http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01

Dedicatoria

A todos los habitantes de Pomacanchi y las comunidades aledañas a la laguna de Urcos, cuya conexión ancestral con la madre tierra nos inspira a trabajar por la conservación de nuestros ecosistemas. A nuestras familias, que con su apoyo incondicional hicieron posible esta investigación, y especialmente a la memoria de nuestros antepasados, quienes supieron cuidar y preservar estos humedales como legado para las futuras generaciones.

Esta investigación es un homenaje a quienes día a día trabajan por la protección del medio ambiente y la mitigación del cambio climático, reconociendo en la naturaleza no solo un recurso, sino un hogar que debemos cuidar y proteger.

Los autores

Agradecimiento

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos los profesores del Departamento de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales, cuyas enseñanzas y guía han sido fundamentales en la construcción de esta investigación. En especial, agradezco profundamente al Magister José Salustio Pozo Gonzales, por compartir conmigo su pasión por la disciplina y por tomarse el tiempo de leer y comentar los borradores de mi tesis, siempre con generosidad y entusiasmo.

Los autores

Resumen

La laguna de Urcos representa un ecosistema lacustre de gran importancia ecológica, no solo por su biodiversidad, sino también por su función como sumidero de carbono. La pérdida de estos ecosistemas implica una disminución en su capacidad de capturar y almacenar carbono, lo cual incrementa los efectos del cambio climático. El objetivo principal de esta investigación fue cuantificar la cantidad de carbono almacenado en la biomasa de la totora (*Typha angustifolia*) y en el suelo de la laguna de Urcos, con el propósito de evidenciar su rol como sumidero de carbono y reforzar la necesidad de su protección. Se aplicó una metodología de enfoque cuantitativo que incluyó la toma de muestras representativas en cuatro cuadrantes de suelo. Se recolectaron muestras de totora (raíz, tallo y hojas, hojarasca). El carbono orgánico del suelo se determinó mediante el método Walkley-Black, técnica química utilizada para estimar el contenido de materia orgánica en el suelo; el de la biomasa vegetal, en cambio, se estimó mediante ecuaciones alométricas. Los resultados mostraron que la totora almacena 86.5 toneladas de carbono por hectárea, mientras que el suelo retiene un promedio de 158.07 toneladas por hectárea, evidenciando que el suelo representa una mayor reserva de carbono que la biomasa vegetal. En conclusión, la laguna de Urcos cumple una función clave en la mitigación del cambio climático. Se recomienda implementar medidas de conservación y manejo sostenible para preservar su capacidad de almacenamiento de carbono.

Palabras clave: Carbono orgánico, totora, suelos lacustres, almacenamiento de carbono, laguna de Urcos.

Abstract

Lake Urcos, located in Quispicanchis province (Cusco, Peru), is a high-Andean lacustrine ecosystem of significant ecological importance due to its biodiversity and its role as a carbon sink. The main objective of this research was to quantify the total carbon stored in totora biomass (*Typha angustifolia*) and soil in order to highlight its contribution to climate change mitigation and underscore the need for its conservation. A quantitative approach was employed, involving representative sampling in four soil quadrants and the collection of totora samples (roots, stems, leaves, and litter). Soil organic carbon was determined using the Walkley-Black method, whereas plant biomass carbon was estimated through validated allometric equations. Results revealed that totora biomass stores 86.5 t C ha^{-1} , while the soil retains an average of $158.07 \text{ t C ha}^{-1}$, confirming that the soil compartment constitutes the largest carbon reservoir. It is concluded that Lake Urcos plays a key role in climate change mitigation at the regional level. Therefore, the implementation of conservation measures and sustainable management practices is strongly recommended to preserve its carbon sequestration capacity.

Keywords: Organic carbon, totora, lacustrine soils, carbon storage, Urcos lagoon.

Índice

Portada.....	i
Acta de sustentación	ii
Reporte de similitud.....	iii
Metadatos.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento.....	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
Índice de tablas	xi
Índice de figuras.....	xiii
Índice de anexos.....	xvi
I. Introducción.....	17
II. Planteamiento del problema	19
2.1. Descripción y formulación del problema.....	19
2.2. Objetivos.....	21
2.2.1. Objetivo general.....	21
2.2.2. Objetivos específicos:	21
2.3. Justificación e importancia.....	21
2.4. Hipótesis.	23
2.5. Variables	24
III. Marco teórico.....	26
3.1. Antecedentes	26
3.2. Bases teóricas.....	46
3.3. Definición de términos.....	111
IV. Metodología.....	114
4.1. Tipo y nivel de investigación	114

4.2. Ámbito temporal y espacial	115
4.3. Población y muestra	117
4.4. Instrumentos.....	121
4.5. Procedimiento	121
4.6. Análisis de datos	133
4.7. Consideraciones éticas	136
V. Resultados y Discusión.....	137
5.1. Resultados	137
5.2. Discusión de resultados.....	164
5.3. Prueba de hipótesis	169
VI. Conclusiones.....	176
VII. Recomendaciones	177
VIII. Referencia.....	179
IX. Anexos.....	186

Índice de tablas

Tabla 1 Matriz de operacionalización de variables	25
Tabla 2 Comparación de los métodos de estimación de carbono en el suelo	109
Tabla 3 Características del totoral	139
Tabla 4 Características del suelo	141
Tabla 5 Carbono contenido en la totora	146
Tabla 6 Carbono contenido en el suelo	148
Tabla 7 Almacenamiento total del carbono y CO ₂ en la laguna	150
Tabla 8 Carbono CO ₂ contenido según punto de muestreo	152
Tabla 9 Propiedades del Suelo: Densidad y Humedad.....	153
Tabla 10 Promedios de Densidad Seca por sector	154
Tabla 11 Concentración de Carbono en vegetación hidrofílica y Suelo	155
Tabla 12 Variaciones de Carbono por Profundidad y Componente.....	161
Tabla 13 Comparación de Medias entre Necromasa y Suelo.....	161
Tabla 14 Medias descriptivas de la suma de necromasa (tn/ha de C) por posición de muestreo	161
Tabla 15 Datos del programa InfoStat	162
Tabla 16 Resultados ANOVA: posición y componente × profundidad.....	163
Tabla 17 Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilk)	170
Tabla 18 Tukey - Suma de tn/ha (C) Total por Posición.....	171
Tabla 19 Prueba t de una Muestra versus 50 tn/ha	172

Tabla 20 ANOVA de medidas repetidas	173
Tabla 21 Prueba post-hoc Tukey HSD para medidas repetidas ($\alpha = 0.05$)	174
Tabla 22 Prueba t de Student Pareada: necromasa versus suelo por profundidad	175

Índice de figuras

Figura 1	Ciclo del carbono en ecosistemas acuáticos – terrestres de una laguna	47
Figura 2	Ciclo geológico del carbono	50
Figura 3	Ciclo del carbono en ecosistemas acuáticos y suelos anóxicos	52
Figura 4	Estructura Ilustración botánica del totoral (Typha sp.)	80
Figura 5	Plano de ubicación de la laguna de Urcos	116
Figura 6	Ubicación de los puntos de toma de muestra en la laguna de Urcos	118
Figura 7	Recolección de muestras de vegetación	119
Figura 8	Recolección de la biomasa aérea	119
Figura 9	Distribución en el cuadrante	120
Figura 10	Diagrama de partes muestreadas	123
Figura 11	Extracción de raíces gruesas	123
Figura 12	Muestreo de biomasa aérea.....	124
Figura 13	Marco referencia para muestreo de necromasa	125
Figura 14	Pesaje de muestras de suelo	126
Figura 15	Obtención de muestra de suelo a 1 metro de profundidad.....	126
Figura 16	Recolección de muestras con el muestreador	127
Figura 17	Auger manual.....	127
Figura 18	Revestimiento de muestras de densidad de suelo	128
Figura 19	Pesaje de muestras de suelo	128
Figura 20	Muestra en el laboratorio	129

Figura 21 Proceso de secado en el laboratorio.....	130
Figura 22 Clasificación de muestras	130
Figura 23 Laguna de Urcos Quispicanchis y área de totoral	137
Figura 24 Características del totoral	138
Figura 25 Características del suelo	140
Figura 26 Perfil de densidad del suelo húmedo con profundidad.....	142
Figura 27 Perfil de densidad del suelo seco con profundidad.....	143
Figura 28 Perfil de humedad del suelo en relación a la profundidad.....	143
Figura 29 Carbono contenido en la totora y suelo	145
Figura 30 Carbono orgánico contenido en el suelo.....	147
Figura 31 Carbono contenido en el suelo (tn/ha) y contenido total (tn/ha)	150
Figura 32 Identificación de áreas de toma de muestra	192
Figura 33 Delimitación con puntos GPS el Area del totoral.....	192
Figura 34 Delimitcion interna del totoral mediante GPS.....	193
Figura 35 Delimitación del área por puntos (A) para levantamiento de muestras. 193	
Figura 36 Armado de los cuadros de madera.....	194
Figura 37 Marcación de las muestras de suelo para extracción	194
Figura 38 Extracción de muestra de suelo a los 30cm	195
Figura 39 Toma de muestra a los 60 cm de suelo	195
Figura 40 Extracion de muestra de suelo a 1 metro	196
Figura 41 Intrusión de cilindros en suelo para la intención de densidad	196

Figura 42 Etiquetado de las muestras almacenadas por cuadrante (A,B,C,D)	197
Figura 43 Empaquetado de muestras de suelo	197
Figura 44 Extracción de muestras de totora sumergida	198
Figura 45 Almacenamiento raices delgadas.....	198
Figura 46 Extracción de muestras de densidad de suelo.....	199
Figura 47 Biomasa seca de totora sumergida.....	199
Figura 48 Triturado del suelo para análisis granulométrico.....	200
Figura 49 Análisis granulométrico mediante tamizado	200
Figura 50 Rotulado de muestras de densidad de suelo	201

Índice de anexos

Anexo 1. Matriz de consistencia.....	187
Anexo 2: Solicitud de permiso presentada para el desarrollo de la investigación	189
Anexo 3: Informe de laboratorio medición % de carbono en las muestras.....	190
Anexo 4: Panel fotográfico.....	192

I. Introducción

El cambio climático es una amenaza ambiental global, causada principalmente por la creciente concentración de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO_2). Este gas atrapa el calor en la atmósfera y altera los ciclos naturales, provocando fenómenos como sequías, inundaciones y pérdida de cultivos (Friedlingstein et al., 2022). Una solución natural es la captura y almacenamiento de carbono, función que cumplen diversos ecosistemas, incluidos los lagos lacustres (Mitsch & Gosselink, 2015).

Los ecosistemas acuáticos como lagunas, humedales y bofedales desempeñan un papel clave como sumideros de carbono, ya que permiten almacenar este gas tanto en la biomasa vegetal como en el suelo (Huaman et al., 2020). En el Perú, especialmente en los ecosistemas lacustres altoandinos, existe poca información sobre su potencial como sumideros de carbono (Suaña Jaen, 2023). La laguna de Urcos, ubicada en la provincia de Quispicanchis (Cusco), es uno de estos ecosistemas. Además de su valor ecológico y cultural, posee condiciones propicias para capturar y almacenar carbono, principalmente a través de la totora (*Schoenoplectus californicus* , comúnmente conocida como *Typha angustifolia* en algunos contextos locales) (Cronk & Fennessy, 2016)

Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la reserva total de carbono almacenado en el totoral y el suelo de la laguna. Para ello, se aplicó un enfoque cuantitativo, de nivel descriptivo, con un diseño no experimental transversal. Se realizaron mediciones de campo, recolección de muestras y análisis de laboratorio, utilizando el método Walkley-Black para cuantificar el carbono orgánico (Walkley & Black, 1934).

Entre las principales limitaciones encontradas se identificaron el difícil acceso al cuerpo de agua y la intervención humana en los bordes, lo cual dificultó el trabajo de muestreo. Sin embargo, los resultados mostraron que la laguna de Urcos almacena un total de 244.59 toneladas de carbono por hectárea, lo que equivale a más de 2300 toneladas de CO₂ equivalente en todo el ecosistema analizado. Este hallazgo destaca su papel en la mitigación del cambio climático y la necesidad de promover su conservación (Mitsch & Gosselink, 2015)

El presente trabajo de investigación se organiza en ítems que abordan el planteamiento del problema, los fundamentos teóricos, la metodología empleada, los resultados obtenidos, la discusión de los hallazgos, y finalmente, las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones y para la formulación de políticas ambientales.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

El cambio climático constituye una de las principales amenazas ambientales a nivel global, impulsado por el incremento constante de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO₂). Este gas atrapa la radiación térmica en la atmósfera, provocando un aumento en la temperatura global y alteraciones en los ciclos naturales, tales como sequías, lluvias extremas, deshielo, pérdida de biodiversidad, entre otros impactos. Frente a esta situación, la captura y almacenamiento de carbono en ecosistemas naturales ha sido identificada como una estrategia efectiva de mitigación. Sin embargo, a nivel internacional y nacional, aún persiste una limitada comprensión sobre la capacidad de ciertos ecosistemas de altura, como los ecosistemas lacustres andinos para actuar como sumideros de carbono. (European Environment Agency, 2020)

En el Perú, los estudios sobre humedales, bofedales y lagunas en este contexto son escasos, particularmente en los ecosistemas altoandinos. La laguna de Urcos, ubicada en la provincia de Quispicanchi, distrito de Cusco, es una demostración de ecosistema lacustre con potencial para almacenar carbono, especialmente a través de especies vegetales como la totora (*Typha angustifolia*). Sin embargo, enfrenta problemas como la débil institucionalidad ambiental, la gestión fragmentada entre niveles de gobierno y la presión humana sobre sus márgenes. (Kleeberg & Delgado, 2015)

La falta de acciones orientadas a la conservación de estos ecosistemas puede conllevar a su progresiva degradación y, eventualmente, a su desaparición. Esta pérdida no solo implicaría

la reducción de áreas que actúan como sumideros naturales de carbono, sino también la pérdida de servicios ecosistémicos esenciales, incluyendo la regulación hídrica, la purificación del agua y la biodiversidad asociada. Además, se perdería la oportunidad de generar conocimiento científico valioso sobre sus capacidades ecológicas, como el almacenamiento de carbono en biomasa y suelo. (Medrano y otros, 2012).

Implementar estrategias de conservación y monitoreo en los ecosistemas lacustres altoandinos es una medida clave para mantener y potenciar su capacidad como sumideros de carbono. Estas acciones permiten evaluar de forma continua su estado y, en caso de degradación, aplicar medidas de recuperación adecuadas. La presente investigación aporta evidencia científica sobre la capacidad de almacenamiento de carbono en la laguna de Urcos, cuantificando el contenido de carbono en la biomasa de la totora y en el suelo a distintas profundidades. Esta información no solo contribuye al conocimiento académico, sino que también puede ser útil para la formulación de políticas públicas, programas de restauración ecológica y campañas de educación ambiental orientadas a la conservación de estos ecosistemas estratégicos. (Alvis Et al, 2018)

2.1.1. Formulación del problema

Problema general

- ¿Cuáles son las reservas totales de carbono almacenado en el totoral y suelo de la laguna de Urcos Quispicanchis?

Problemas específicos

- ¿Cuál es el área de cobertura del totoral en la laguna de Urcos Quispicanchis?
- ¿Cuál es la cantidad de carbono almacenado en la totora (tallo aéreo, tallo sumergido, hojarasca, raíz) en la laguna de Urcos Quispicanchis?
- ¿Cuál es la cantidad de carbono almacenado en el suelo (hojarasca) de la laguna de la laguna de Urcos Quispicanchis?

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo general

- Evaluar la reserva de carbono almacenado en el totoral y suelo de la laguna de Urcos Quispicanchis.

2.2.2. Objetivos específicos:

- Determinar el área de cobertura del totoral en la laguna de Urcos Quispicanchis
- Evaluar el almacenamiento de carbono en el totoral (raíz, tallo aéreo y tallo sumergido) en la laguna de Urcos Quispicanchis
- Estimar la cantidad total de carbono almacenado en el suelo (hojarasca) de la laguna de la laguna de Urcos Quispicanchis.

2.3. Justificación e importancia

La totora y sus variedades se encuentran comúnmente en los bordes de muchas lagunas, tanto en estado natural como cultivadas, y cumplen un papel muy importante en el ecosistema. En estos espacios se concentra una gran diversidad de fauna, como aves locales y migratorias, peces de agua dulce, anfibios y varias especies de plantas acuáticas. Además de eso, la totora tiene funciones ecológicas esenciales que muchas veces no son valoradas, como la captura de carbono y el mantenimiento del equilibrio del ecosistema. (Manual de Diseño de un Humedal Artificial, 2011)

En los últimos años, se ha comenzado a valorar mucho más la importancia de los humedales, lagunas y lagos a nivel global. No solo por su biodiversidad, sino porque también son fuente de agua para muchas ciudades y comunidades. Además, cumplen funciones importantes como la filtración natural del agua, el control del clima y la recreación. En países como el nuestro, estos espacios también están empezando a ser protegidos por su valor

ambiental, social y económico. Investigaciones como las de Juana Ticona-Quea, Gary Vanzin, Sheyla Toledo, Héctor Aponte y Fernando Gil Villacres han resaltado la importancia de conservarlos, ya que muchas personas los visitan buscando tranquilidad, contacto con la naturaleza o incluso por actividades económicas.

En Perú contamos con muchos humedales, entre ellos el lago Titicaca, uno de los más conocidos por su extensión y riqueza ecológica. En todos estos ecosistemas, la totora cumple varios roles, desde el uso tradicional en la alimentación y construcción, hasta su función como planta capaz de capturar y almacenar carbono. Desde la revolución industrial, las emisiones de CO₂ han aumentado considerablemente, y eso ha contribuido al cambio climático y al deterioro ambiental que hoy ya estamos viviendo. Por eso es importante estudiar estos ecosistemas, entender sus funciones y buscar formas de protegerlos.

En el caso de la laguna de Urcos, se trata de una fuente fundamental de agua para muchas actividades de la zona, como la agricultura, la ganadería, la pesca y el turismo local. También es un espacio que favorece la biodiversidad, aunque actualmente se enfrenta a problemas como la quema de vegetación por parte de algunos pobladores, sin considerar las consecuencias que esto tiene en la emisión de dióxido de carbono y el daño al ecosistema. (La República Sostenible, 2025).

Esta investigación nace precisamente por esa preocupación. Se busca analizar cuánto carbono puede almacenar la totora y el suelo del humedal, usando un enfoque cuantitativo y el método Walkley-Black. Esto permitirá tener datos claros sobre su aporte ambiental y pensar en nuevas formas de manejar este recurso sin destruirlo. Se pretende que este estudio también sirva como referencia para otras investigaciones similares, especialmente en zonas altoandinas que han sido poco exploradas.

Desde lo social, este trabajo tiene importancia porque los humedales como la laguna de Urcos no solo aportan al medio ambiente, sino también al desarrollo de las comunidades. Son

fuentes de agua, empleo, alimentos y turismo, por lo que protegerlos también es una forma de mejorar la calidad de vida de la gente.

En lo práctico, los resultados permitirán identificar opciones más sostenibles para el uso de la totora, evitando prácticas perjudiciales como la quema, y proponiendo alternativas que respeten al medio ambiente y que sean viables para la población.

Desde el punto de vista teórico, el estudio contribuye a llenar un vacío sobre la captura de carbono en ecosistemas altoandinos del Perú. Existen pocos datos al respecto, por lo que esta investigación aporta información relevante que puede ser usada por estudiantes, profesionales y autoridades interesadas en el cambio climático y la gestión ambiental.

Y en cuanto a la parte metodológica, se adapta una técnica ya conocida para el análisis de carbono en una realidad geográfica específica, lo cual abre la posibilidad de aplicar este enfoque en otros humedales del país.

Además, en Urcos también hay espacios turísticos y de recreación administrados por los propios pobladores, lo que demuestra que el desarrollo económico local puede ir de la mano con la conservación ambiental. Esto refuerza la necesidad de proteger el humedal, no solo por razones ecológicas, sino también porque puede ser una fuente de oportunidades para las futuras generaciones además del valor cultural que posee.

2.4. Hipótesis.

2.4.1. Hipótesis general.

- Las reservas de carbono almacenado varían significativamente entre las diferentes partes del totoral (aérea y subterránea) y con la profundidad del suelo en la laguna de Urcos.

2.4.2. Hipótesis específicas

- La captura de carbono en la cobertura totoral de la laguna de Urcos es

significativamente mayor a 50 tn/ha.

- El almacenamiento de carbono en la totora varía significativamente entre raíz, tallo aéreo y el tallo sumergido en la laguna de Urcos Quispicanchis.
- La cantidad de carbono almacenado (tn /ha) en la necromasa es mayor a las diferentes profundidades de suelo en la laguna de Urcos Quispicanchis.

2.5. Variables

- **Variable independiente:** Vegetación hidrofílica y suelo
- **Variable dependiente:** Captura de carbono

Tabla 1*Matriz de operacionalización de variables*

Variable independiente	Dimensiones	Definición	Indicadores	Escala de medición
Vegetación hidrofílica y suelo	Vegetación hidrofílica	Conjunto de especies vegetales adaptadas a ambientes acuáticos o húmedos, en este caso representadas por <i>Typha angustifolia</i> , evaluadas por su biomasa y cobertura (Cronk & Fennessy, 2001).	- Especie de totora - Cobertura vegetal por <i>Typha angustifolia</i> - Cantidad de la biomasa (raíces, necromasa, tallo aérea y subterránea)	% cobertura tn/ha
	Suelo	Componente edáfico del total, evaluado en función de su densidad, humedad y profundidad de muestreo (Brady & Weil, 2017).	- Densidad del suelo - Contenido de humedad - Profundidad del suelo muestreado (30, 60 y 100 cm)	g/cm ³ % nominal
Variable dependiente	Dimensiones	Definición	Indicadores	Escala de medición
Captura de carbono	Capacidad de captura de carbono	Capacidad de la vegetación y el suelo del total para almacenar carbono orgánico, estimado mediante análisis químicos (Walkley & Black) y factores de conversión de CO ₂ (Walkley & Black, 1934).	- Carbono en biomasa del total - CO ₂ capturado por la biomasa	-tn/ha
	Carbono en el suelo	Es la cantidad de carbono almacenado en la materia orgánica del suelo, proveniente de restos de plantas, raíces y microorganismos, que influye en la fertilidad, estructura y capacidad del suelo para retener nutrientes y agua (Lal, 2004).	-Carbono en el suelo -CO ₂ capturado en suelo	-tn/ha -

III. Marco teórico

3.1. Antecedentes

3.1.1. Antecedentes internacionales

Ramsar, representa uno de los principales instrumentos jurídicos y políticos a nivel internacional enfocados en la conservación de los ecosistemas acuáticos continentales y costeros. Desde su adopción en 1971 en Ramsar, Irán, este tratado intergubernamental ha evolucionado significativamente en términos de alcance y resultados. Su misión, claramente establecida como “la conservación y el uso racional de los humedales mediante acciones locales, regionales y nacionales y gracias a la cooperación internacional”, apunta directamente a la integración de la conservación ambiental con el desarrollo sostenible, alineándose con los principios de la Agenda 21 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Hasta enero de 2013, un total de 163 países se habían comprometido formalmente como Partes Contratantes. Este número no sólo refleja la legitimidad y aceptación global del tratado, sino también el reconocimiento de la función vital que desempeñan los humedales para la seguridad hídrica, la biodiversidad y la resiliencia climática. En esa fecha, se habían designado más de 2.060 sitios Ramsar con una superficie combinada que superaba los 197 millones de hectáreas, lo cual constituye una de las redes más extensas de áreas protegidas del planeta, centradas en un tipo de ecosistema históricamente subvalorado. Entre los resultados más destacables de la Convención de Ramsar se encuentran: Protección legal y planificación de manejo: Muchos sitios Ramsar han sido incorporados en marcos legislativos nacionales como áreas protegidas,

lo cual ha permitido su monitoreo, vigilancia y manejo adaptativo. Esto ha contribuido a reducir la degradación ambiental, la conversión de humedales en zonas agrícolas o urbanas, y la pérdida de especies endémicas. Incremento del conocimiento científico: Ramsar ha promovido el desarrollo de inventarios nacionales de humedales, evaluaciones ecológicas, estudios hidrológicos y bases de datos integradas, fortaleciendo la gestión basada en evidencia y facilitando la toma de decisiones informadas. Cooperación internacional y regional: Se han establecido acuerdos multilaterales y transfronterizos para el manejo conjunto de cuencas hidrográficas, corredores ecológicos y humedales compartidos, como el caso del Pantanal entre Brasil, Bolivia y Paraguay, o los humedales del sistema del Danubio en Europa. Participación comunitaria y desarrollo local: Ramsar fomenta el involucramiento de las comunidades locales y pueblos indígenas, quienes dependen directamente de los humedales para su subsistencia. Proyectos apoyados por la Convención han mejorado medios de vida mediante ecoturismo, pesca sostenible y uso tradicional compatible con la conservación. Contribución a la mitigación del cambio climático: Los humedales, especialmente turberas y manglares, son reservorios clave de carbono. Su conservación ayuda a reducir emisiones de gases de efecto invernadero, al tiempo que mejora la capacidad de adaptación frente a eventos climáticos extremos como sequías e inundaciones. Sin embargo, a pesar de estos avances, persisten desafíos importantes. Muchos sitios Ramsar continúan enfrentando amenazas como contaminación, sobreexplotación de recursos hídricos, urbanización descontrolada y cambio climático. Además, algunos países muestran debilidades en la implementación de planes de manejo y en el seguimiento efectivo de sus compromisos internacionales. Por tanto, se concluye que, aunque la Convención de Ramsar ha generado impactos positivos cuantificables a nivel global, la efectividad real de sus resultados depende de la voluntad política, la asignación de recursos técnicos y financieros, y el fortalecimiento de las capacidades locales. Su rol como instrumento internacional sigue siendo crucial en la lucha por un desarrollo sostenible que reconozca el

valor estratégico de los humedales como ecosistemas esenciales para la vida humana y la biodiversidad

(Boone Kauffman, 2017) El presente estudio fue cuantificar las reservas de carbono de los manglares oceánicos (en la franja costera) y estuarinos en Pantanos de Centla, México. El estudio realizado por Kauffman, Humberto, María del Carmen, JChris y Wilfrido (2017) en los Pantanos de Centla, México, proporciona evidencia cuantitativa sobre la capacidad de almacenamiento de carbono de los ecosistemas de manglar, tanto en zonas oceánicas como estuarinas. Los resultados obtenidos muestran una notable variabilidad en las reservas de carbono, con cifras que van desde 342 toneladas métricas por hectárea (Mg C/ha) en el manglar del Río Grijalva, hasta 2,099 Mg C/ha en el manglar conocido como Cometa. El promedio registrado fue de 1,358 Mg C/ha, una cifra significativamente mayor que la encontrada en pastizales utilizados para ganadería, donde las reservas apenas alcanzaron los 458 Mg C/ha. Estos datos reflejan con claridad que los manglares almacenan entre 2 a 4 veces más carbono que otros usos del suelo, lo que los posiciona como sumideros clave en la lucha contra el cambio climático. Esta capacidad de secuestro de carbono, tanto en la biomasa aérea como en los sedimentos subterráneos, no sólo contribuye a la mitigación de los gases de efecto invernadero, sino que también ofrece una alternativa natural de bajo costo para alcanzar las metas climáticas establecidas en acuerdos internacionales como el Acuerdo de París. Sin embargo, los manglares enfrentan un acelerado proceso de deforestación y degradación, motivado principalmente por el cambio de uso del suelo hacia actividades agrícolas, ganaderas, acuícolas y urbanas. Esta destrucción no solo implica la pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos, sino también la liberación a la atmósfera de las enormes cantidades de carbono previamente almacenadas, lo que convierte estos ecosistemas en fuentes de emisiones en lugar de sumideros. Dado lo anterior, resulta evidente que la conservación y restauración de manglares debe ser una prioridad en las estrategias nacionales de mitigación y adaptación al cambio climático. Integrar

estos ecosistemas en políticas públicas permite no sólo reducir emisiones, sino también fortalecer la resiliencia de las comunidades costeras frente a eventos extremos como huracanes, erosión y aumento del nivel del mar. En este contexto, el estudio de Boone Kauffman y colaboradores no solo aporta cifras valiosas, sino que también respalda con base científica la necesidad de vincular los esfuerzos de conservación con las metas climáticas y de desarrollo sostenible.(Boone Kauffman et al., 2017)

En el marco del Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB), se reconoce de manera explícita el papel fundamental que desempeñan los humedales y lagunas en la conservación de la biodiversidad a nivel mundial. Estos ecosistemas, ya sean de agua dulce, salobre o salada, albergan una gran variedad de especies de flora y fauna, muchas de ellas endémicas o en peligro de extinción. Además, proporcionan servicios ecosistémicos esenciales como la regulación hídrica, el control de inundaciones, la filtración de contaminantes y el sustento de actividades económicas y culturales de comunidades locales.

Dentro de este marco legal internacional, el Protocolo de Cartagena sobre Seguridad de la Biotecnología, adoptado en 2000 (aunque no en 1983 como se menciona), pero igualmente enfocado en la protección de la biodiversidad frente a posibles riesgos derivados del uso de organismos vivos modificados (OVM), establece principios aplicables a diversos ecosistemas, incluyendo los humedales marinos y costeros. Aunque el protocolo se centra en el manejo seguro de la biotecnología moderna, subraya de manera implícita la necesidad de prevenir cualquier forma de contaminación o alteración genética que pueda comprometer la integridad ecológica de los ecosistemas vulnerables, como los humedales costeros.

Si bien su enfoque principal está dirigido hacia las zonas marinas y costeras, muchos de los principios de precaución, prevención y evaluación del riesgo contenidos en este instrumento legal son extensibles a humedales interiores, lagunas y otros cuerpos de agua dulce, que enfrentan presiones similares por contaminación, introducción de especies invasoras, o uso

indebido de tecnologías no reguladas. Esto cobra especial relevancia considerando que los humedales continentales, al igual que los costeros, son hábitats clave para numerosas especies migratorias, anfibias y acuáticas, así como depósitos críticos de carbono y agua dulce.

En consecuencia, la articulación entre el CDB y otros convenios internacionales como Ramsar refuerza la necesidad de integrar políticas de conservación y regulación biotecnológica en el manejo de los humedales, tanto marinos como continentales. Esto incluye desde la prevención de la contaminación, hasta el diseño de marcos regulatorios que aseguren que el desarrollo tecnológico no ponga en riesgo la biodiversidad que estos ecosistemas sostienen. Tal integración es esencial para avanzar hacia una gobernanza ambiental coherente y eficaz, especialmente en un contexto global marcado por el cambio climático, la pérdida acelerada de biodiversidad y el crecimiento de actividades humanas en zonas ecológicamente sensibles.

La Evaluación de los Ecosistemas de Agua Dulce publicada en 2008 por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), en colaboración con la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) y otras entidades científicas, constituye un análisis riguroso y global sobre el estado y la función de los ecosistemas de agua dulce, con un énfasis particular en los humedales. Este informe destaca que los humedales de agua dulce —ríos, lagos, pantanos, marismas y estuarios interiores— desempeñan un papel crucial en el ciclo hidrológico, al actuar como reguladores naturales del flujo de agua, facilitando la recarga de acuíferos, amortiguando inundaciones y reteniendo sedimentos y nutrientes. Además de su función hidrológica, la evaluación resalta que los humedales son centros de biodiversidad excepcionales, albergando una gran variedad de especies acuáticas, terrestres y migratorias que dependen directamente de estos entornos para su supervivencia. Se calcula que un porcentaje significativo de especies de peces, aves, anfibios y plantas acuáticas tienen en los humedales su hábitat principal, lo cual los convierte en uno de los ecosistemas más diversos y productivos del planeta. Sin embargo, el informe también advierte sobre el

rápido deterioro de estos ecosistemas debido a actividades humanas como la expansión agrícola, la construcción de represas, la contaminación industrial y doméstica, y la sobreexplotación de recursos hídricos. Este deterioro no solo amenaza la biodiversidad, sino que compromete directamente los servicios ecosistémicos que los humedales prestan a millones de personas, especialmente en regiones vulnerables a la escasez de agua y al cambio climático. En este sentido, la evaluación sostiene que la conservación y restauración de los humedales de agua dulce debe ser considerada una prioridad dentro de las políticas ambientales nacionales e internacionales. Para ello, se requiere no solo la protección legal de estos ecosistemas, sino también una gestión integrada del recurso hídrico que contemple aspectos ecológicos, sociales y económicos. La inclusión activa de los humedales en los planes de ordenamiento territorial, el fortalecimiento de la gobernanza hídrica y la educación ambiental son estrategias claves para frenar su degradación. En conclusión, la Evaluación de los Ecosistemas de Agua Dulce de 2008 refuerza la idea de que los humedales no son simples cuerpos de agua marginales, sino componentes esenciales del equilibrio ecológico y del bienestar humano, cuya conservación es fundamental para alcanzar los objetivos de sostenibilidad y adaptación al cambio climático.

El Convenio sobre la Protección y el Uso de los Cursos de Agua Transfronterizos y de los Lagos Internacionales, adoptado en 1992 en Helsinki, representa un hito en el derecho ambiental internacional al establecer un marco legal sólido para la cooperación entre países que comparten recursos hídricos. Este tratado, promovido por la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE-ONU), reconoce que los cuerpos de agua que cruzan fronteras —incluidos ríos, lagos, humedales y lagunas— requieren de una gestión coordinada y sostenible, debido a su importancia ecológica y estratégica para el abastecimiento de agua, la biodiversidad y el bienestar de las poblaciones. Uno de los principales aportes del Convenio de Helsinki es su enfoque en la prevención, control y reducción de la contaminación transfronteriza, lo cual es especialmente relevante para los humedales y cuerpos de agua que

se extienden a lo largo de varios países. Al establecer principios de uso equitativo y razonable, así como el deber de no causar daño significativo a otros Estados ribereños, el convenio sienta las bases para una gobernanza hídrica internacional que respete tanto los intereses nacionales como los derechos ambientales colectivos.

Además, el tratado promueve la cooperación técnica y científica, el intercambio de información, y la creación de mecanismos conjuntos de monitoreo y alerta temprana ante riesgos ambientales. Esto es vital para la conservación de humedales transfronterizos, ya que estos ecosistemas son especialmente sensibles a las alteraciones hidrológicas, la contaminación agrícola o industrial, y el cambio climático, cuyas consecuencias no respetan límites políticos. En este contexto, el Convenio de Helsinki no solo contribuye a la protección de ecosistemas compartidos, sino que también fortalece la diplomacia ambiental y el diálogo regional, facilitando soluciones integradas a problemas comunes como la escasez de agua, la pérdida de biodiversidad o los conflictos por el uso del recurso hídrico. Los humedales transfronterizos, al ser zonas de transición ecológica y cultural, se benefician particularmente de este enfoque colaborativo que busca equilibrar el desarrollo económico con la protección del capital natural. Por tanto, la aplicación efectiva de este convenio es esencial para garantizar la sostenibilidad y resiliencia de los sistemas hídricos internacionales, especialmente aquellos que albergan humedales y lagunas de alta importancia ecológica. Su articulación con otros instrumentos como la Convención de Ramsar, el Convenio sobre la Diversidad Biológica o la Evaluación de Ecosistemas del Milenio, refuerza una visión integrada del manejo de los ecosistemas acuáticos, clave para enfrentar los retos ambientales del siglo XXI.

A lo largo de las últimas décadas, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha recurrido a la proclamación de Años Internacionales como una estrategia para sensibilizar a la comunidad global sobre problemáticas ambientales urgentes, entre ellas, la conservación del agua dulce y los humedales. Estas iniciativas han tenido como objetivo principal generar mayor

conciencia, promover el debate político, fomentar la cooperación internacional y movilizar recursos en torno a temas clave para el desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente. En este contexto, el Año Internacional del Agua Dulce, celebrado en 2003, representó un momento clave para visibilizar la importancia estratégica de los ecosistemas acuáticos continentales, incluyendo ríos, lagos, lagunas y humedales. Durante ese año, se promovió el entendimiento sobre el papel fundamental que juegan estos ecosistemas en el suministro de agua potable, la producción de alimentos, la regulación del clima y la prevención de desastres naturales, beneficiando directamente a millones de personas en todo el mundo. Además, se destacó cómo la degradación de estos ecosistemas pone en riesgo no solo la biodiversidad acuática, sino también la seguridad hídrica y alimentaria de las poblaciones humanas, especialmente en regiones vulnerables. Posteriormente, en 2008, la ONU proclamó el Año Internacional de los Humedales, una iniciativa orientada a profundizar la comprensión pública sobre la multifuncionalidad de los humedales y a impulsar acciones concretas para su conservación. Este esfuerzo contribuyó a reforzar los compromisos asumidos por los países en el marco de la Convención de Ramsar, al mismo tiempo que promovió la integración de los humedales en los planes nacionales de ordenamiento territorial, adaptación al cambio climático y desarrollo sostenible. La campaña también enfatizó el papel de los humedales como sumideros de carbono, hábitats de especies clave y barreras naturales frente a fenómenos extremos, como huracanes e inundaciones. Ambas declaraciones —2003 y 2008— han sido fundamentales para colocar a los humedales y cuerpos de agua dulce en el centro del debate ambiental internacional, consolidando su reconocimiento como ecosistemas indispensables para el equilibrio ecológico y el bienestar humano. Además, estos Años Internacionales han servido como plataforma para generar alianzas intergubernamentales, académicas y comunitarias, así como para incentivar la creación de políticas públicas, programas educativos y proyectos de restauración ecológica. En definitiva, estos esfuerzos de sensibilización no solo

han contribuido a visibilizar la importancia de los humedales, sino que han fortalecido el marco normativo y la acción ambiental a escala global, lo cual es esencial en un contexto donde la pérdida acelerada de estos ecosistemas compromete gravemente la sostenibilidad planetaria.

En el año 2018, se publicó la Evaluación Global de los Humedales, un informe internacional de gran relevancia elaborado por Wetlands International en colaboración con diversas organizaciones científicas y ambientales. Esta evaluación proporcionó un análisis exhaustivo y actualizado sobre el estado de los humedales a nivel mundial, revelando una tendencia preocupante: estos ecosistemas están desapareciendo más rápidamente que cualquier otro tipo de ecosistema natural. El informe pone de manifiesto que, pese a su reconocido valor ecológico y social, los humedales siguen siendo objeto de degradación, drenaje, conversión a usos agrícolas y urbanos, y contaminación, todo ello como resultado de actividades humanas insostenibles. Uno de los principales aportes de este informe radica en su enfoque basado en la evidencia científica, que permite no solo documentar la pérdida acelerada de humedales, sino también identificar zonas críticas y proponer estrategias de intervención orientadas a la restauración ecológica. La evaluación destaca que la disminución de estos ecosistemas tiene consecuencias directas en múltiples dimensiones: pérdida de biodiversidad, reducción de la capacidad de almacenamiento de carbono, mayor vulnerabilidad ante desastres naturales, y deterioro en la calidad del agua y en los medios de vida de millones de personas que dependen de los humedales. En este sentido, el informe enfatiza la necesidad urgente de implementar políticas públicas sólidas, construidas sobre una base científica rigurosa, que prioricen tanto la conservación como la restauración activa de humedales. Esto implica no solo designar nuevas áreas protegidas o fortalecer las existentes, sino también reintegrar humedales degradados al paisaje funcional, mediante enfoques como la restauración hidrológica, la recuperación de la vegetación nativa y la gestión integrada de cuencas. Asimismo, se subraya la importancia de establecer mecanismos efectivos de monitoreo, financiamiento sostenible y participación

comunitaria, como elementos claves para lograr impactos duraderos. La Evaluación Global de los Humedales también advierte que sin una intervención coordinada e inmediata, los objetivos establecidos por la Convención de Ramsar, el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente aquellos relacionados con la vida en ecosistemas terrestres (ODS 15) y el agua limpia (ODS 6), se verán seriamente comprometidos. Por lo tanto, el informe se convierte en un llamado a la acción urgente para gobiernos, comunidades científicas y sociedad civil, resaltando que la recuperación de los humedales es no solo un imperativo ecológico, sino también una inversión estratégica para el futuro del planeta.

3.1.2. Antecedentes nacionales

El estudio desarrollado por Morocco (2014) en el Santuario Nacional Lagunas de Mejía, ubicado en Arequipa, Perú, proporciona evidencia empírica sobre los beneficios ambientales que ofrecen los humedales costeros, particularmente en términos de captura y almacenamiento de carbono, un servicio ecosistémico clave en la lucha contra el cambio climático. El análisis se centró en cuatro unidades de vegetación características del humedal: Totoral, Juncal, Gramadal y Salicornial, evaluando en cada una de ellas la cantidad de carbono almacenado en diferentes compartimentos o reservorios: biomasa aérea, biomasa muerta (material vegetal muerto), biomasa subterránea y suelo. Los resultados mostraron que la estructura del suelo representa el mayor reservorio de carbono entre todos los evaluados, lo cual reafirma la importancia de los humedales como sumideros naturales, en especial debido a su alta capacidad para acumular materia orgánica en condiciones anaeróbicas que ralentizan su descomposición. Entre las unidades de vegetación analizadas, el Totoral presentó las mayores reservas de carbono orgánico, alcanzando un valor de 235.74 toneladas de carbono por hectárea (TC/ha). Le siguieron en capacidad de almacenamiento el Juncal con 95.27 TC/ha, el Salicornial con 55.79 TC/ha y, finalmente, el Gramadal con 23.93 TC/ha. Asimismo, el estudio cuantificó la

reserva total de dióxido de carbono almacenado (TCO_2), destacando nuevamente las unidades de Totoral y Juncal como las más significativas, con 36,856 TCO_2 y 37,697 TCO_2 , respectivamente. Un hallazgo clave fue que la acumulación de carbono no depende únicamente del grado de colonización vegetal o de la cobertura del suelo, sino más bien de la eficiencia fotosintética de las especies presentes, es decir, de su capacidad fisiológica para capturar carbono atmosférico y transformarlo en biomasa. Estos datos son de especial relevancia para la planificación ambiental y la formulación de políticas de mitigación del cambio climático, ya que evidencian que ciertos humedales, por su composición vegetal y características edáficas, pueden desempeñar un papel altamente eficaz en el secuestro de carbono. En este sentido, el Santuario Nacional Lagunas de Mejía no solo representa un refugio de biodiversidad, sino también un activo estratégico para la acción climática en el contexto peruano y regional. Por tanto, este estudio refuerza la necesidad de priorizar la conservación y restauración de humedales con alto potencial de captura de carbono, integrando estos ecosistemas dentro de los planes nacionales de conservación, manejo de áreas naturales protegidas y políticas de carbono azul. Además, promueve el reconocimiento de la diversidad funcional de las especies vegetales como un factor determinante en la capacidad de los ecosistemas para contribuir a la estabilidad climática global.

Gutiérrez C. (2017). En la investigación se estima el stock de carbono en la unidad de vegetación juncal y suelo que ocupa esta unidad de vegetación dentro del ACRAMM (Área de Conservación Regional Albuferas de Medio Mundo) de la provincia de Huaura Lima - Perú. La metodología de muestra se definió en cuatro puntos de muestreo, considerando estadios fenológicos y la asociación: “Junco” juvenil, “Junco” Maduro y “Junco” senescente y “Junco” Asociado; en cada punto de muestreo se evaluaron 3 parcelas (0m al borde del espejo de agua, a los 5m y a los 10m con respecto al espejo de agua); en cada parcela se evaluó la parte aérea del “junco” (1m^2), biomasa muerta (0.5m^2), raíz (0.25m^2) y suelo (20cm de profundidad

dentro de los 0.25m²), el análisis del porcentaje de carbono se realizó con el horno de Inducción ELTRA. La media de los cuatro puntos de muestreo de carbono almacenado, en parte aérea es 4tC/ha, biomasa muerta 7.5tC/ha, raíz 3.54tC/ha y suelo 46.2tC/ha. El juncal del ACRAMM tiene una extensión de 71.72has, por esta cantidad de área, el total de carbono almacenado es 4378.76tC/ha y el total de CO₂ capturado 16070.15t CO₂. (Gutierrez Rosas, 2017)

En la investigación realizada por Medrano, Chupan y Vila (2012), se abordó el análisis del almacenamiento de carbono en las especies vegetales más representativas del ecosistema del lago Chinchaycocha, ubicado en la región andina del Perú. El estudio se caracterizó por un enfoque metodológico de tipo exploratorio-comparativo, en el cual se examinaron tres ecosistemas de humedal distintos: el totoral, el pajonal y el bofedal. El objetivo principal fue cuantificar la capacidad de almacenamiento de carbono de las especies predominantes en cada uno de estos ambientes naturales. Para medir el contenido de carbono en los suelos, se utilizó la técnica del método Walkley-Black, una metodología clásica y eficaz para determinar el carbono orgánico presente en muestras de suelo. Este procedimiento permite estimar de forma indirecta la cantidad de carbono almacenado, lo cual es esencial para comprender el papel que juegan los diferentes tipos de vegetación en el ciclo global del carbono. Los resultados del estudio revelaron que, entre los tres ecosistemas evaluados, el totoral es el que presenta la mayor capacidad de almacenamiento de carbono, lo que se puede atribuir a su densa biomasa y a la alta productividad de la totora (*Schoenoplectus californicus*), una especie que tiene una gran acumulación de materia orgánica. En segundo lugar se encuentra el pajonal, compuesto principalmente por gramíneas y otras especies herbáceas, que si bien presentan una menor biomasa que el totoral, aún contribuyen significativamente al almacenamiento de carbono. Finalmente, el bofedal, aunque desempeña un rol importante dentro del ecosistema andino, mostró el nivel más bajo de acumulación de carbono en comparación con los otros dos. Un aspecto fundamental destacado en la investigación es que los suelos constituyen los principales

sumideros de carbono dentro de estos ecosistemas. Esto significa que no solo la vegetación viva juega un papel clave en la captura de CO₂ atmosférico, sino que el suelo, al almacenar materia orgánica, actúa como un reservorio natural que retiene carbono durante largos periodos de tiempo. Este hallazgo es especialmente relevante en el contexto actual de cambio climático, ya que la conservación y restauración de estos ecosistemas pueden contribuir significativamente a la mitigación de gases de efecto invernadero. Por tanto, este estudio no solo proporciona información valiosa sobre la distribución del carbono en ecosistemas altoandinos, sino que también resalta la necesidad de implementar políticas de gestión sostenible que protejan estos ambientes frágiles, reconociendo su papel crucial en el equilibrio climático global.(Medrano et al., 2012)

En la investigación realizada por Alvis (2018), se llevó a cabo una estimación detallada del contenido de carbono almacenado en los humedales altoandinos, específicamente en los bofedales del distrito de Caylloma, ubicado en la región de Arequipa, Perú. Este estudio tuvo como objetivo principal determinar la cantidad de carbono retenido en diferentes componentes del ecosistema del bofedal, reconociendo su papel como un importante sumidero natural de carbono en los Andes. La toma de muestras se realizó durante el mes de octubre, utilizando un equipo especializado tipo core, con un diámetro de 5.5 cm y una profundidad de 30 cm, el cual permitió extraer muestras representativas del sustrato. Las muestras fueron clasificadas en tres estratos fundamentales: la biomasa aérea, compuesta por hojas y tallos; la biomasa subterránea, integrada principalmente por raíces; y finalmente el suelo, considerado uno de los compartimentos más importantes para la acumulación de carbono orgánico a largo plazo. Para determinar el contenido de carbono en las muestras, se utilizó el método de Walkley-Black, una técnica química ampliamente validada en estudios de suelo, que permite calcular el carbono orgánico presente mediante oxidación química. Además, para el procesamiento y análisis de los datos obtenidos, se utilizó el software estadístico SPSS versión 2.3, en su versión de prueba.

A nivel estadístico, se aplicó un ANOVA de una sola variable para identificar diferencias significativas entre los estratos evaluados, complementando el análisis con una prueba de comparaciones múltiples de Duncan, que permitió precisar en qué grupos se concentraban las diferencias. Uno de los hallazgos más relevantes del estudio fue la estimación del carbono total almacenado en el bofedal de Chalhuanca, cuya extensión fue calculada en 882.54 hectáreas. Se determinó que este ecosistema almacena aproximadamente 795,415.65 toneladas de dióxido de carbono (TCO_2), una cifra que evidencia la enorme capacidad de los bofedales para captar y conservar carbono atmosférico. Este resultado resalta la importancia ecológica y climática de los humedales altoandinos como sumideros naturales de carbono, contribuyendo de forma activa a la mitigación del cambio climático. Desde una perspectiva ambiental, estos datos refuerzan la urgencia de implementar estrategias de conservación y manejo sostenible de los bofedales, ya que la degradación o pérdida de estos ecosistemas podría liberar grandes cantidades de carbono almacenado, agravando aún más el calentamiento global. En consecuencia, estudios como el de Alvis (2018) son fundamentales para sustentar científicamente políticas de protección ambiental en zonas altoandinas, donde el equilibrio ecológico es particularmente vulnerable y estratégico para el clima global.

La tesis elaborada por Ruiz (2018), titulada "Estudio de la biodiversidad de los humedales en la cuenca del río Napo, región Loreto", constituye una valiosa contribución al conocimiento científico de los ecosistemas amazónicos, específicamente de los humedales ubicados en la cuenca del río Napo, una de las zonas ecológicamente más ricas y a la vez más vulnerables de la Amazonía peruana. En esta investigación, el autor se propuso analizar la biodiversidad presente en estos humedales, tanto en términos de fauna como de flora, así como identificar y evaluar los principales factores de origen humano que están generando presiones y alteraciones sobre dichos ecosistemas. El estudio no solo se limitó a describir la diversidad biológica, sino que adoptó un enfoque integral, considerando aspectos claves de la ecología de

los humedales amazónicos, como la interdependencia entre especies, la dinámica del agua, y las funciones ecosistémicas que estos ambientes cumplen. Entre las principales amenazas identificadas, destacan actividades humanas como la agricultura extensiva, la ganadería, la pesca indiscriminada, y la expansión de asentamientos humanos, las cuales están provocando una fragmentación del hábitat, disminución de especies, y una alteración significativa en los ciclos ecológicos. Desde el enfoque de biodiversidad e impacto antropogénico, la tesis de Ruiz hace un llamado de atención sobre la rapidez con que estas actividades están degradando ecosistemas que durante siglos se han mantenido en equilibrio, y que cumplen funciones esenciales como la regulación del ciclo hidrológico, el almacenamiento de carbono, la provisión de alimentos y la conservación de especies endémicas y migratorias. El autor subraya la necesidad urgente de implementar políticas de manejo sostenible y planes de conservación participativa, que involucren tanto a las autoridades como a las comunidades locales. Además, el estudio resalta que los humedales de la cuenca del Napo no solo son importantes por su riqueza biológica, sino también por su valor cultural y social, ya que muchas comunidades amazónicas dependen directamente de estos ecosistemas para su subsistencia. Por ello, la investigación también incorpora una dimensión socioambiental, reconociendo que la sostenibilidad de estos territorios debe basarse en un equilibrio entre conservación ecológica y bienestar humano. En resumen, la tesis de Ruiz (2018) no solo documenta la diversidad de los humedales amazónicos en Loreto, sino que también aporta una mirada crítica y propositiva frente al deterioro ambiental causado por el impacto humano. Se trata de un trabajo relevante tanto para la investigación científica como para la formulación de políticas públicas en favor de la conservación y uso sostenible de los humedales amazónicos del Perú.

Basurto Salvatierra (2022) realizó un estudio aplicado en el bofedal del Centro Poblado de Choclococha, ubicado en el distrito de Santa Ana, provincia de Castrovirreyna, departamento de Huancavelica, con el objetivo de determinar el almacenamiento total de

carbono en *Distichia muscoides* Nees & Meyen. Mediante un diseño no experimental de corte transversal y la metodología del Centro Mundial Agroforestal (ICRAF, 2009), donde se muestrearon 7 puntos aleatorios en grillas de 100 x 100 m sobre un área de 35.61 ha, empleando un barreno de metal y suelo, y analizando el carbono orgánico por el método de Walkley & Black. Sus resultados mostraron que la cantidad de carbono es 7.07 tn/ha en biomasa herbácea, 12.90 tn/ha en raíces, 331.82 tn/ha en necromasa y 97.15 tn/ha en suelo (0–60 cm), totalizando 448.94 tn/ha (equivalente a 15 986.75 tn y 58 671.38 toneladas de dióxido de carbono en toda el área. Este trabajo resalta la importancia de los bofedales altoandinos como reservorios clave de carbono, especialmente por la alta contribución de la necromasa y el suelo, y aporta una base metodológica y comparativa para investigaciones en ecosistemas húmedos dominados por macrófitas como la totora.

3.1.3. Antecedentes locales

Velasco H. (2023). Para esta investigación se analizó la estimación de captura de CO₂ (kg., tn.) a través de la medición de la captura de carbono en especies arbóreas en la Avenida de La Cultura, distrito de San Sebastián, provincia y departamento del Cusco. Para lo cual se usó las características de la población total de las plantaciones forestales tales como el diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total, densidad de la madera, nombre común, nombre científico, género y familia de cada especie. Se aplicó el método indirecto o no destructivo a través de la ecuación alométrica propuesta por Chavez et al. (2005) para calcular la cantidad de biomasa y así poder estimar la cantidad de CO₂ capturado. Se lograron identificar 980 individuos entre 10 especies forestales, 3 especies forestales nativas y 7 especies forestales exóticas, la más representativa fue la especie *Alnus acuminata* Kunth (Aliso), mientras que la más representativa de las especies forestales exóticas fue el *Fraxinus* spp (Fresno). La especie más común fue la de *Fraxinus* spp. representando el 86.12% de la población total. La cantidad total de biomasa aérea de las especies forestales nativas fue de 0.799 tn. con una captura de

1.375 tn. de CO₂ donde la especie más representativa fue *Alnus acuminata* Kunth, mientras que para las especies Exóticas la cantidad total de biomasa aérea fue de 84.019 Tn. con una captura de 144.778 tn. de CO₂ siendo la especie más representativa *Fraxinus* sp. Dando así un total de 146.153 tn. de CO₂ capturado para el año 2023, se llegó a la conclusión de que existe una diferencia significativa entre la medida de CO₂ capturado por las especies forestales nativas y exóticas, la medida de CO₂ emitido por el establecimiento automotor en el tramo de estudio es principalmente elevada frente a la medida de CO₂ capturado por las plantaciones forestales presentes en el mismo tramo.

Yanque-Yucra (2019), El presente trabajo se desarrolló en el humedal urbano Phuyuqocha – Cajonahuaylla, Cusco, cuyo objetivo fue evaluar el estado ecológico del humedal. Se consideró cuatro indicadores: batimétricos y morfométricos, biológicos (fitoplancton, macroinvertebrados acuáticos, macrófitos, fauna superior), microbiológicos (Coliformes termo tolerantes) e indicadores físicos y químicos del agua. La metodología correspondió a la propuesta por Rico, 2006. La evaluación batimétrica y morfométrica muestra una profundidad máxima de 1,07 m, lecho irregular, superficie de espejo de agua 4 108,78 m², volumen de 4 109.88 m³. Considerando el protocolo seguido, la valoración de los indicadores morfométricos califica como muy malo, los biológicos muy malo, los indicadores físicos y químicos malo y los indicadores microbiológicos moderado; la valorización general de todos los indicadores alcanza un promedio de 1.07 puntos, el mismo que corresponde a un estado ecológico general malo. Las causas de degradación del humedal, que reducen su estado ecológico, corresponden a la presencia de residuos sólidos, presencia de animales domésticos, arrojado de desmontes, cerco de protección deteriorado entre otros.(Yanque–Yucra et al., 2019)

La tesis desarrollada por Huanca (2019), presentada en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, se enfocó en el estudio de la biodiversidad de los humedales ubicados en la provincia de Paucartambo, una zona representativa de los ecosistemas andinos del sur del Perú.

Este trabajo de investigación abordó de manera integral la riqueza biológica presente en los bofedales y humedales altoandinos, ecosistemas que, aunque a menudo pasan desapercibidos, desempeñan un papel fundamental en la regulación ecológica de las regiones altoandinas. El estudio se centró en el análisis de especies tanto vegetales como faunísticas, prestando especial atención a aquellas especies consideradas endémicas, así como a las aves migratorias que utilizan estos humedales como sitios clave de descanso y alimentación durante sus rutas estacionales. Esta aproximación permitió valorar no solo la diversidad biológica presente, sino también las funciones ecológicas que estos ecosistemas cumplen a nivel regional y continental. Uno de los principales aportes de la tesis fue resaltar que los humedales de Paucartambo, especialmente los bofedales, constituyen refugios vitales para la conservación de la biodiversidad local, y actúan como hábitats estratégicos en el contexto del cambio climático, dado que permiten la persistencia de especies altamente especializadas y vulnerables. Asimismo, se reconoció su importancia para el mantenimiento de procesos ecológicos esenciales, como la regulación hídrica, la captura de carbono, y la provisión de servicios ecosistémicos a las comunidades altoandinas. El enfoque de investigación combinó elementos de ecología de humedales andinos con una visión de conservación biológica, subrayando que estos ecosistemas están bajo presión creciente debido a factores antrópicos como el sobrepastoreo, el cambio en el uso del suelo, la expansión agrícola y la escasez de políticas de manejo ambiental sostenibles. La investigación de Huanca no solo documentó la existencia y distribución de diversas especies, sino que también propuso líneas de acción para promover la conservación activa y participativa de estos ambientes, en colaboración con las comunidades locales. En conclusión, esta tesis constituye un aporte significativo al conocimiento científico y ecológico de los humedales andinos del Cusco, y refuerza la idea de que la protección de estos ecosistemas debe ser una prioridad dentro de las estrategias regionales de conservación de la biodiversidad altoandina. Además, se evidencia la necesidad de continuar promoviendo

investigaciones similares que visibilicen el valor ecológico y cultural de los humedales andinos como patrimonios naturales de alto valor ecológico.

En su tesis titulada "Restauración ecológica de los bofedales en la región de Cusco: Caso de estudio en el área de Chinchero", Sánchez (2016) abordó de manera profunda los desafíos ambientales que enfrentan los bofedales altoandinos, con un enfoque específico en el área de Chinchero, situada en la región Cusco. Este trabajo se centró en los procesos de restauración ecológica, entendidos como el conjunto de acciones orientadas a recuperar la estructura, la funcionalidad y la biodiversidad original de los ecosistemas degradados. La autora realizó un diagnóstico detallado de las principales causas de degradación de los bofedales, identificando como factores críticos el cambio climático —especialmente las alteraciones en los patrones de precipitación y el retroceso de glaciares—, así como las actividades agropecuarias intensivas, que incluyen el sobrepastoreo, el drenaje inadecuado de los suelos y la conversión de zonas húmedas en terrenos agrícolas. Estos impactos han generado la pérdida progresiva de cobertura vegetal, erosión del suelo y disminución de la capacidad de almacenamiento hídrico, lo que compromete gravemente el equilibrio ecológico de los humedales. Ante esta situación, la investigación propuso un conjunto de prácticas de restauración ecológica, centradas en dos pilares fundamentales: la conservación del agua y la recuperación de la vegetación nativa. Entre las estrategias sugeridas se incluyen la construcción de micro reservorios para retención de agua, el control del pastoreo, la reintroducción de especies vegetales autóctonas adaptadas a las condiciones altoandinas, y el diseño de planes participativos de manejo comunitario de los recursos naturales. Estas prácticas buscan no solo restablecer las funciones ecológicas del bofedal, sino también garantizar su sostenibilidad a largo plazo, beneficiando tanto al medio ambiente como a las poblaciones locales que dependen de estos ecosistemas. El enfoque de la tesis combina principios de ecología de la restauración, conservación del agua y gestión sostenible de los recursos naturales, subrayando que los

bofedales no solo son reservas de biodiversidad, sino también elementos esenciales en la regulación hídrica de las cuencas andinas. Asimismo, se reconoce que la restauración ecológica debe ir acompañada de procesos de educación ambiental, fortalecimiento institucional y participación activa de las comunidades campesinas, cuyas prácticas tradicionales pueden ser claves para una restauración exitosa. En síntesis, el estudio de Sánchez (2016) constituye una aportación relevante al campo de la restauración ecológica de humedales altoandinos, al ofrecer un modelo de intervención aplicable a otros territorios que enfrentan problemáticas similares. Su trabajo resalta la urgencia de actuar frente al deterioro de los bofedales, no solo por su valor ecológico, sino también por su papel en la seguridad hídrica, la resiliencia climática y la conservación de los paisajes andinos.

La tesis desarrollada por Huamani (2015), presentada en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, se enfocó en el monitoreo y evaluación de la calidad del agua en los humedales de la cuenca del río Apurímac, una zona de vital importancia para el abastecimiento de agua potable en la región sur andina del Perú. Este trabajo tuvo como objetivo principal analizar el estado actual de la calidad del agua en estos ecosistemas, considerando la creciente presión que ejercen sobre ellos diversas actividades humanas que amenazan su equilibrio ecológico. La investigación se desarrolló bajo un enfoque integral de monitoreo ambiental, combinando análisis físico-químicos del agua con un estudio de los factores externos que inciden en su calidad. Se identificaron como principales fuentes de contaminación la minería informal y la agricultura intensiva, dos actividades que, debido a una gestión deficiente y al uso descontrolado de insumos químicos, contribuyen significativamente a la degradación de los humedales y a la alteración de sus funciones ecosistémicas. Uno de los aspectos más relevantes del estudio fue la detección de contaminantes, entre ellos metales pesados, cuyos niveles en algunos puntos de muestreo superaban los límites permisibles establecidos por los estándares de calidad ambiental. La presencia de elementos como

mercurio, plomo y arsénico no solo representa un riesgo para la biodiversidad acuática, sino también para las comunidades humanas que dependen del agua de estos humedales para el consumo, la agricultura y la ganadería. El enfoque metodológico incluyó análisis sistemáticos a lo largo del tiempo, lo que permitió observar tendencias en la calidad del agua y generar una base científica para la toma de decisiones ambientales. Asimismo, se puso en evidencia la necesidad de implementar sistemas de vigilancia ambiental continua, además de estrategias de mitigación y control, particularmente en zonas donde la minería y el uso agroquímico han alterado significativamente el equilibrio natural. En términos más amplios, la tesis subraya que los humedales de la cuenca del Apurímac no solo son ecosistemas estratégicos por su biodiversidad, sino también por su función crítica en la regulación hídrica y el suministro de agua limpia a numerosas comunidades andinas. Por ello, Huamani plantea que cualquier política de desarrollo económico en la región debe ir acompañada de criterios de sostenibilidad y protección ambiental, priorizando la salud de los ecosistemas frente a los intereses extractivos de corto plazo. En conclusión, el estudio de Huamani (2015) ofrece un análisis riguroso y contextualizado sobre la calidad del agua en humedales altoandinos, revelando la vulnerabilidad de estos ecosistemas frente al impacto de las actividades humanas, y proponiendo medidas concretas de monitoreo, restauración y gestión integrada de los recursos hídricos. Su investigación contribuye a fortalecer la base técnica necesaria para promover un manejo sostenible de las cuencas andinas, garantizando así el equilibrio ecológico y el bienestar de las poblaciones que dependen de estos ecosistemas.

3.2. Bases teóricas

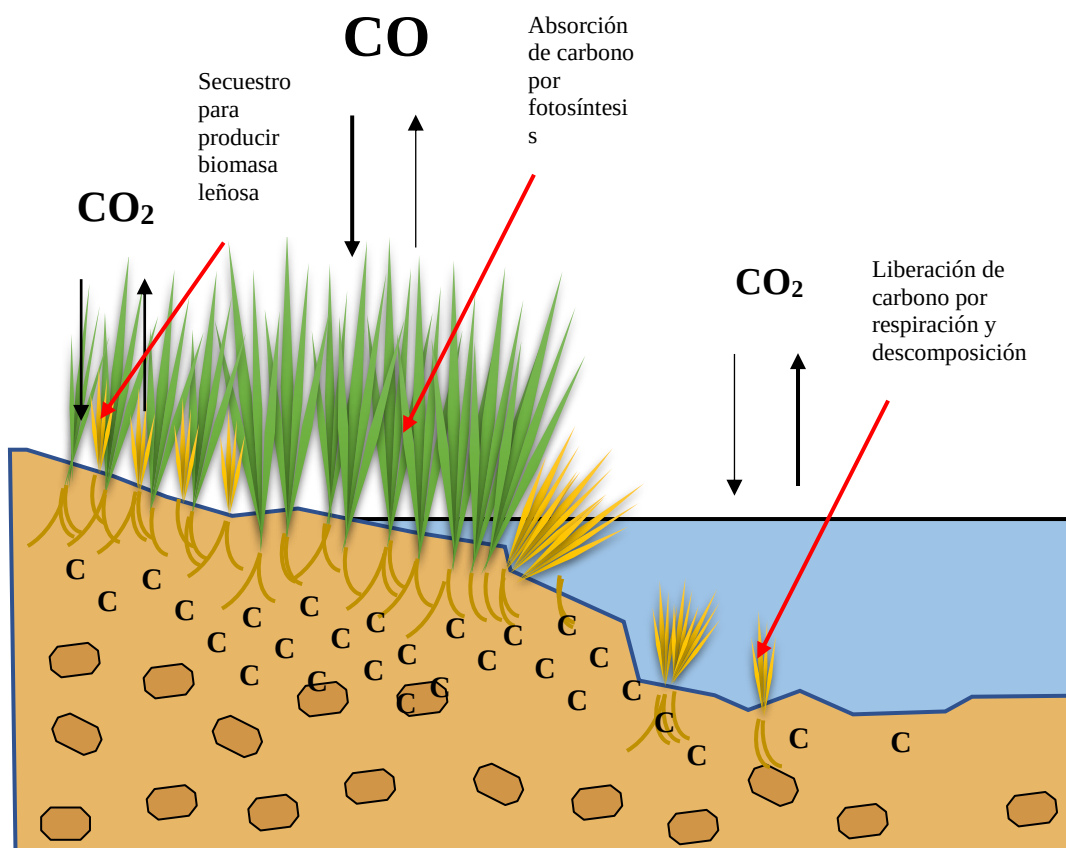
3.2.1. Almacenamiento de carbono en ecosistemas acuáticos

Los ecosistemas acuáticos, como océanos, manglares, marismas y praderas de pastos marinos, son esenciales para regular el clima del planeta. Esto se debe a que capturan y

almacenan dióxido de carbono (CO_2), un gas que contribuye al calentamiento global. Este proceso de almacenamiento de carbono es conocido como "carbono azul" cuando ocurre en humedales costeros. (The Blue Carbon Partnership., 2015)

Figura. 1

Ciclo del carbono en ecosistemas acuáticos – terrestres de una laguna



El ciclo del carbono en estos ecosistemas funciona así: organismos como el fitoplancton, las algas y las plantas acuáticas absorben CO_2 de la atmósfera durante la fotosíntesis. Con este proceso, convierten el CO_2 en materia orgánica que sirve de alimento para otros seres vivos. Cuando estos organismos mueren o son consumidos, parte del carbono que contienen se hunde hacia las profundidades del océano, donde puede permanecer atrapado durante miles de años.

Los ecosistemas como los manglares y las praderas marinas, almacenan grandes cantidades de carbono en su biomasa y sedimentos. Sin embargo, si estos ecosistemas son

degradados o destruidos, el carbono previamente almacenado puede liberarse nuevamente a la atmósfera, acelerando el cambio climático. Por ello, su conservación y restauración son claves para mitigar el calentamiento global. (The Blue Carbon Partnership., 2015)

Los océanos también juegan un papel crucial, ya que absorben aproximadamente el 30% del CO₂ emitido por las actividades humanas. Esto ayuda a reducir las concentraciones de este gas en la atmósfera, regulando el clima. Sin embargo, estas valiosas áreas enfrentan amenazas como la acidificación de las aguas, causada por el exceso de CO₂, y la destrucción de sus hábitats. Estos problemas pueden reducir su capacidad para almacenar carbono.(Copernicus, 2017)

Los ecosistemas acuáticos son aliados fundamentales en la lucha contra el cambio climático. No solo capturan y almacenan carbono, sino que también mantienen el equilibrio necesario para la vida en la Tierra. Para asegurar su funcionamiento, es vital implementar estrategias de conservación y restauración.

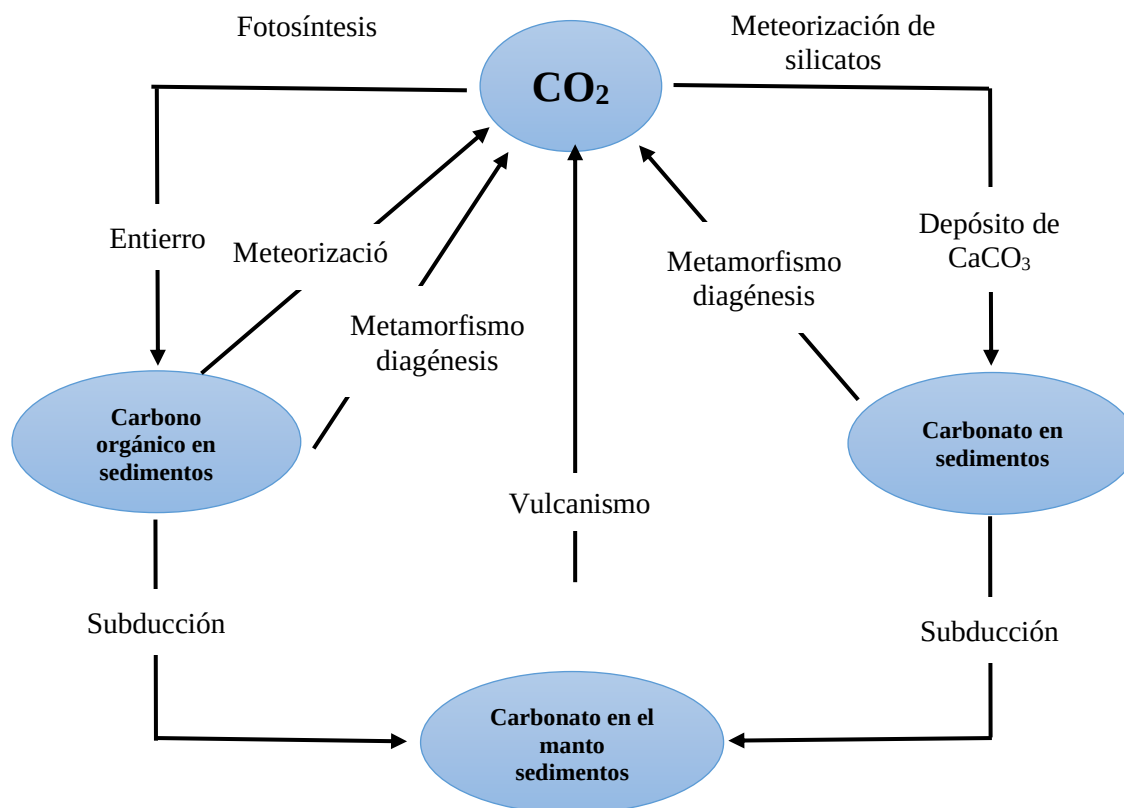
El carbono es un elemento básico para la vida. Es el componente principal de moléculas esenciales como los carbohidratos, grasas, proteínas y ácidos nucleicos, que forman parte de todos los seres vivos. En los ecosistemas, el carbono circula a través del ciclo del carbono, un proceso que regula cuánto CO₂ hay en la atmósfera y en los océanos. (National Aeronautics and Space Administration, 2011)

Durante la fotosíntesis, las plantas y otros organismos absorben CO₂ y lo convierten en materia orgánica. Luego, a través de la respiración y la descomposición, el carbono vuelve al ambiente, completando el ciclo. Este equilibrio es esencial para mantener la vida en el planeta.

Además, el CO₂ es un gas de efecto invernadero que contribuye al calentamiento global. Por eso, los ecosistemas que almacenan carbono, como los bosques y los océanos, son cruciales para mitigar el cambio climático. En definitiva, el carbono no solo es fundamental para los seres vivos, sino también para el equilibrio del clima global.

3.2.2. El ciclo del carbono

El dióxido de carbono (CO_2) es un gas natural y un subproducto de actividades como la quema de combustibles fósiles, la combustión de biomasa, el uso del suelo y procesos industriales como la producción de cemento. Este gas es el principal contribuyente al efecto invernadero generado por las actividades humanas, afectando el balance energético de la Tierra al atrapar calor en la atmósfera. Además, sirve como referencia para medir el impacto de otros gases de efecto invernadero debido a su abundancia y larga permanencia en la atmósfera. Otro gas importante es el metano (CH_4), que, aunque se encuentra en menor cantidad, tiene un potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el CO_2 . Las emisiones de metano varían según los ecosistemas: los humedales salinos emiten cantidades insignificantes debido a la presencia de sulfatos, mientras que los humedales de agua dulce liberan mayores cantidades. Sin embargo, los humedales salinos destacan por su capacidad para almacenar grandes cantidades de carbono por unidad de área, lo que los convierte en aliados clave contra el cambio climático. (NatureScot, 2020)

Figura. 2*Ciclo geológico del carbono*

Nota: Esta basado en la explicación de Riebeek (2011) en el cual detalla el ciclo del carbono

Los humedales, especialmente aquellos asociados a lagunas, son cruciales para capturar y almacenar carbono, desempeñando un papel fundamental en la mitigación del cambio climático. Estos ecosistemas no solo actúan como sumideros de carbono, sino que también protegen contra inundaciones, sequías y hambrunas al regular los ciclos hidrológicos. La degradación de estos ecosistemas aumenta la vulnerabilidad de las comunidades locales frente a estos desafíos ambientales, lo que resalta la importancia de restaurar y mantener sus ciclos naturales del agua. Esto es especialmente relevante en países como Perú, donde las emisiones de CO₂ han aumentado considerablemente en las últimas décadas. Entre 1994 y 2000, estas pasaron de 98.8 millones de toneladas a 120 millones, alcanzando 1.87 toneladas métricas per cápita en 2013. La deforestación es la principal causa de estas emisiones, generando aproximadamente 110 millones de toneladas de CO₂ al año, un problema que subraya la

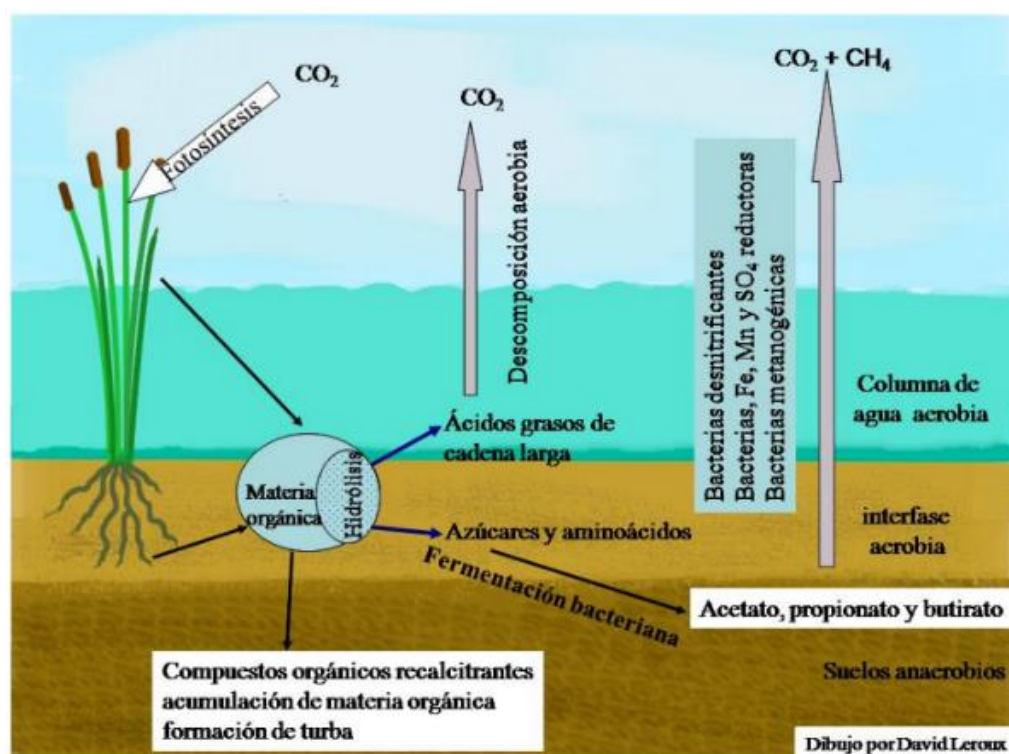
necesidad de implementar políticas efectivas para reducir la tala de bosques y promover prácticas sostenibles. (MINAM, 2019)

El carbono, como elemento esencial para la vida, es el cuarto más abundante en el universo y el componente básico de todas las moléculas orgánicas, como la glucosa, las proteínas y los ácidos nucleicos. En la naturaleza, se encuentra principalmente en forma de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera y los océanos, así como en la biomasa y los combustibles fósiles. Su ciclo se renueva aproximadamente cada 20 años gracias a procesos naturales como la fotosíntesis de las plantas, la respiración y la actividad de los microorganismos del suelo. El carbono puede clasificarse en dos tipos principales: el carbono inorgánico, derivado de componentes minerales y que puede formarse sin intervención biológica, y el carbono orgánico, que proviene de procesos biológicos y está presente en todos los compuestos orgánicos, incluidos los del suelo. Este último tiene un ciclo de intercambio rápido y es clave para el funcionamiento de los ecosistemas. Ambos tipos de carbono están estrechamente vinculados al equilibrio climático del planeta, ya que su acumulación o liberación influye directamente en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. (NASA, 2011)

En conjunto, los ecosistemas acuáticos y terrestres desempeñan un papel vital en la regulación del clima global al capturar y almacenar carbono. Sin embargo, su capacidad para hacerlo depende de su conservación y manejo adecuado. La protección de humedales, bosques y otros ecosistemas, junto con la reducción de emisiones antropogénicas, es fundamental para enfrentar los desafíos del cambio climático y asegurar un futuro sostenible para el planeta.

Figura. 3

Ciclo del carbono en ecosistemas acuáticos y suelos anóxicos



Nota: David Leroux

El ciclo del carbono es un ciclo biogeoquímico fundamental que describe el intercambio del carbono entre la biosfera, la litosfera, la hidrosfera y la atmósfera de la Tierra. Este ciclo es crucial para mantener el equilibrio de los ecosistemas y regular el clima del planeta.

3.2.3. Reservorios de Carbono:

El ciclo del carbono incluye cuatro reservorios principales:

- **Atmósfera:** Contiene dióxido de carbono (CO_2) y otros gases de efecto invernadero. El CO_2 atmosférico es utilizado por las plantas durante la fotosíntesis para producir glucosa y oxígeno.
- **Océanos:** Los océanos almacenan grandes cantidades de carbono en forma de carbono inorgánico disuelto, organismos marinos y materia no viva. El intercambio de CO_2 entre el océano y la atmósfera es un proceso continuo que ayuda a regular las concentraciones

de CO₂ atmosférico.

- **Sedimentos y Combustibles Fósiles:** Incluyen depósitos de carbono en forma de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) y rocas sedimentarias. Estos depósitos se forman a lo largo de millones de años a partir de restos orgánicos que se han descompuesto y compactado.
- **Biosfera Terrestre:** Comprende todos los organismos vivos, así como la materia orgánica no viva, como el carbono del suelo. Las plantas juegan un papel crucial al absorber CO₂ durante la fotosíntesis y almacenarlo en forma de biomasa.

Procesos del Ciclo del Carbono:

El ciclo del carbono involucra varios procesos clave:

- **Fotosíntesis:** Las plantas absorben CO₂ de la atmósfera y lo convierten en glucosa y oxígeno mediante la fotosíntesis. Este proceso es fundamental para la producción de energía en los ecosistemas terrestres.
- **Respiración:** Tanto las plantas como los animales liberan CO₂ a la atmósfera a través de la respiración, un proceso que descompone la glucosa para liberar energía.
- **Descomposición:** Las bacterias y hongos descomponen la materia orgánica muerta, liberando carbono al suelo y la atmósfera. Este proceso es esencial para el reciclaje de nutrientes en los ecosistemas.
- **Intercambio Océano-Atmósfera:** El CO₂ se disuelve en el agua de los océanos y puede ser liberado de nuevo a la atmósfera. Este intercambio es influenciado por factores como la temperatura del agua y la concentración de CO₂ en la atmósfera.
- **Formación de Rocas Sedimentarias:** Los organismos marinos utilizan CO₂ para formar caparazones y arrecifes de carbonato cálcico (CaCO₃). Al morir, estos restos se depositan en el fondo oceánico y, con el tiempo, se convierten en rocas sedimentarias, almacenando carbono durante millones de años.

3.2.4. Clasificación del Carbono según su Origen y Almacenamiento

- Carbono Marrón: Emitido por actividades humanas a través de la quema completa de combustibles fósiles como el petróleo y el carbón, liberando gases como dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4).
- Carbono Negro: Proviene de procesos de combustión ineficiente en actividades industriales, manifestándose como hollín y polvo atmosférico.
- Carbono Verde: Es el carbono libre en la atmósfera que se almacena en la biomasa de plantas y suelos en ecosistemas forestales, pastizales y cultivos. Estos ecosistemas actúan como sumideros de carbono mediante la fotosíntesis.
- Carbono Azul: Almacenado en ecosistemas marinos y costeros, como fitoplancton, macroalgas, bacterias, fanerógamas, arrecifes de coral, marismas de marea, praderas oceánicas y bosques de manglar. Estos ecosistemas pueden almacenar carbono durante más tiempo y en mayores cantidades.

3.2.5. Biomasa

Según el libro “Centrales termoeléctricas de biomasa”, la biomasa se define como toda materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo residuos y desechos orgánicos, que puede ser utilizada para producir energía. Las plantas desempeñan un papel clave en este proceso, ya que capturan la energía del sol a través de la fotosíntesis y la convierten en energía química, almacenándola en forma de materia orgánica. (García Garrido, 2012).

En la actualidad, la biomasa se entiende como un conjunto de productos energéticos y materias primas renovables derivados de fuentes biológicas recientes. Este concepto excluye los combustibles fósiles y sus derivados, como plásticos u otros materiales sintéticos, ya que, aunque tienen un origen biológico, su formación ocurrió hace millones de años y no se renuevan en tiempos humanos.

Por lo tanto, la biomasa representa una fuente de energía renovable que aprovecha la

capacidad natural de las plantas para capturar la energía solar mediante la fotosíntesis. Esta energía puede transformarse en diversas formas útiles, como calor, electricidad o biocombustibles, contribuyendo así al desarrollo de alternativas más sostenibles frente a los combustibles tradicionales.

Tipos de Biomasa

a) Biomasa Natural: La biomasa natural es aquella que se genera de manera espontánea en los ecosistemas sin intervención humana. Su explotación intensiva no es compatible con la conservación del medio ambiente, aunque sigue siendo una fuente importante de energía en muchos países en desarrollo. Esta biomasa proviene principalmente de residuos forestales, como restos de limpieza de bosques, leñas, ramas, coníferas y frondosas.

b) Biomasa Residual: La biomasa residual proviene de actividades humanas que generan materia orgánica. Su gestión y eliminación puede ser un desafío, pero tiene varias ventajas al ser utilizada como recurso energético:

- Reduce la contaminación y el riesgo de incendios.
- Disminuye el espacio requerido en los vertederos.
- Puede generar costos de producción y transporte bajos.
- Contribuye a la reducción de emisiones de CO₂.
- Genera empleo y promueve el desarrollo rural.

La biomasa residual se clasifica en varias categorías:

Excedentes Agrícolas

Son los productos agrícolas no destinados a la alimentación humana, que pueden ser aprovechados como biomasa para generar energía. Sin embargo, su uso ha generado controversia, ya que algunos acusan que afecta el costo de productos agrícolas esenciales en países en desarrollo. Estos excedentes se pueden utilizar tanto para la generación eléctrica como para producir biocombustibles.

Cultivos Energéticos

Son cultivos específicos cultivados exclusivamente para la producción de energía. A diferencia de los cultivos agrícolas tradicionales, los cultivos energéticos son muy productivos y tienen una alta resistencia a condiciones adversas, como sequías y enfermedades. Estos incluyen tanto cultivos convencionales (cereales, caña de azúcar, semillas oleaginosas) como otros no convencionales, como el cynara, la patata y el sorgo dulce, que están siendo objeto de investigación para optimizar su cultivo.(Javier Rico, 2014)

3.2.6. Bosque y áreas naturales protegidas e impacto en retención de carbono

Los bosques primarios intactos de la Amazonía peruana son cruciales como sumideros de carbono, ofreciendo un servicio ecosistémico esencial a nivel global. Entre 1990 y 2017, estos bosques capturaron 0.52 Mg C/ha por año en Áreas Naturales Protegidas y sus zonas de amortiguamiento, eliminando anualmente unas 9.7 millones de toneladas de carbono, equivalente al 86% de las emisiones de Perú por quema de combustibles fósiles en 2012. Este servicio debe incluirse en el inventario nacional de gases de efecto invernadero para mejorar la precisión del balance de carbono y destacar la importancia de conservar estos bosques por su capacidad de almacenamiento, remoción de carbono y biodiversidad. (VICUÑA MIÑANO et al., 2018)

Para garantizar la continuidad de este servicio, es fundamental implementar una gestión efectiva de las áreas de protección ambiental y establecer sistemas de monitoreo a largo plazo mediante redes como RAINFOR y MonANPerú. Estas iniciativas facilitarían mecanismos financieros para la conservación sostenible. A nivel mundial, los bosques primarios proporcionan servicios clave como captura de carbono, regulación hídrica y conservación de biodiversidad. En Perú, se estima que los bosques almacenan 6.9 mil millones de toneladas de carbono, con un 26% en áreas protegidas, y han actuado como sumideros debido al crecimiento de árboles que supera la mortalidad.(Vicuña Miñano et al., 2002)

Impacto del CO₂ atmosférico

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas de efecto invernadero clave que atrapa calor en la atmósfera. Su aumento se debe principalmente a actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, incendios forestales y procesos industriales, además de fuentes naturales como las erupciones volcánicas. Según mediciones del Observatorio de Mauna Loa en Hawái, los niveles de CO₂ han aumentado continuamente desde la Revolución Industrial, alcanzando un 50% más que en 1750 y superando incluso los cambios ocurridos tras la última glaciación hace 20.000 años.

Las concentraciones globales de CO₂ han pasado de 365 partes por millón (ppm) en 2002 a más de 400 ppm actualmente, afectando principalmente la troposfera media. Además, el ciclo estacional del CO₂ revela fluctuaciones anuales causadas por la fotosíntesis y la descomposición de la vegetación. En el hemisferio norte, las plantas absorben CO₂ en primavera y lo liberan en otoño, creando un patrón de "dientes de sierra" en los gráficos de medición de CO₂. Este ciclo es más pronunciado en el hemisferio norte debido a su mayor extensión de tierra y vegetación.(Friedlingstein et al., 2022)

A largo plazo, la tendencia al alza en los niveles de CO₂ se atribuye principalmente a las emisiones humanas, destacando cómo las actividades antropogénicas están alterando tanto los ciclos naturales como el equilibrio global del carbono los cuales generan cambio climático. (NASA, 2025)

En las últimas décadas, se han observado cambios climáticos significativos: en Cusco, las temperaturas aumentaron entre 0,03 y 0,4 °C, y las precipitaciones incrementaron entre 0,75 y 6,32 mm/año. Además, las heladas se intensificaron en el sur, mientras que disminuyeron en el norte. Las proyecciones para finales del siglo XXI indican mayores incrementos en temperatura (2 a 5 °C) y precipitación (10 a 24%), especialmente por encima de los 3500 msnm, lo que afectará los rendimientos agrícolas y la seguridad alimentaria.(SENAMHI, 2011)

Acuerdos internacionales y políticas ambientales

Se describe diversos tratados, convenios y protocolos internacionales que abordan problemáticas ambientales de alcance global. Estos acuerdos, muchos de los cuales son legalmente vinculantes para los países que los han ratificado, establecen compromisos específicos para su implementación.

En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo en Río de Janeiro (1992), donde se estableció la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), firmada inicialmente por 166 países y hoy ratificada por 197.

El Protocolo de Kioto (1997), primer esfuerzo global vinculante para combatir el calentamiento, marcó un hito al comprometer a los países desarrollados a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. Durante su primera fase (2008-2012), se fijó una reducción mínima del 5% respecto a los niveles de 1990, con mecanismos como el comercio de emisiones para facilitar el cumplimiento. La segunda fase (2013-2020), extendida mediante la Enmienda de Doha, elevó el objetivo de reducción al 18%.

El Acuerdo de París (2015) reemplazó al Protocolo de Kioto a partir de 2020, adoptando un enfoque universal que incluye a todos los países, independientemente de su nivel de desarrollo. Este acuerdo busca limitar el aumento de la temperatura global a menos de 2°C, idealmente por debajo de 1,5°C, y alcanzar emisiones netas cero para 2050, consolidando así una transición hacia un modelo climático más ambicioso y participativo. (iberdrola, 2015)

Estos acuerdos abarcan una gran diversidad de temas, como la conservación de la biodiversidad, la protección del medio marino, el manejo de la contaminación transfronteriza, la seguridad nuclear y la mitigación del cambio climático, evidenciando el esfuerzo global por promover un desarrollo más sostenible.

Se presenta una relación de los principales convenios internacionales sobre medio

ambiente suscritos y/o ratificados por Perú, con información sobre los depósitos, ratificaciones y entrada en vigencia de dichos acuerdos:

1. Convención relativa a los Humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas (Ramsar)
 - Depositaria: director general de la UNESCO, aprobado en Ramsar, Irán, el 2 de febrero de 1971.
 - Ratificación por Perú: 28 de agosto de 1986, mediante la Resolución Legislativa N° 25353 de 23 de noviembre de 1991.
 - Entrada en vigencia: 30 de marzo de 1992.
2. Convenio de Basilea sobre el Movimiento Transfronterizo de Desechos Tóxicos Peligrosos
 - Depositaria: Secretaría General de las Naciones Unidas, aprobado en Basilea, Suiza, el 22 de marzo de 1989.
 - Ratificación por Perú: 28 de octubre de 1993, mediante la Resolución Legislativa N° 26234 del 19 de octubre de 1993.
 - Entrada en vigencia: 21 de febrero de 1994.
3. Convenio sobre Diversidad Biológica
 - Depositaria: Secretaría General de las Naciones Unidas, aprobado en Río de Janeiro, Brasil, el 5 de junio de 1992.
 - Ratificación por Perú: 24 de mayo de 1993, mediante la Resolución Legislativa N° 26181 del 11 de mayo de 1993.
 - Entrada en vigencia: 5 de septiembre de 1993.
4. Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
 - Depositaria: Secretaría General de las Naciones Unidas, aprobado en Nueva York, EE.UU., el 9 de mayo de 1992.

- Ratificación por Perú: 24 de mayo de 1993, mediante la Resolución Legislativa N° 26185 del 12 de mayo de 1993.
- Entrada en vigencia: 21 de marzo de 1994.

5. Convención Internacional de Lucha contra la Desertificación y la Sequía

- Depositaria: Secretaría General de las Naciones Unidas, aprobado en París, Francia, el 17 de junio de 1994.
- Ratificación por Perú: 26 de octubre de 1995, mediante la Resolución Legislativa N° 26536 del 2 de octubre de 1995.
- Entrada en vigencia: 26 de diciembre de 1996.

6. Convenio para la Conservación de las Especies Migratorias de Animales Silvestres
(Convención de Bonn)

- Depositaria: Ministerio de Relaciones Exteriores de la República Federal de Alemania, firmado el 23 de junio de 1979 en Bonn.
- Ratificación por Perú: 20 de febrero de 1997, mediante el Decreto Supremo N° 002/97-RE de fecha 24 de enero de 1997.
- Entrada en vigencia: 1 de junio de 1997.

7. Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

- Depositaria: Secretaría General de las Naciones Unidas, aprobado en Kyoto, Japón, el 11 de diciembre de 1997.
- Ratificación por Perú: 12 de septiembre de 2002, mediante la Resolución Legislativa N° 27824.
- Entrada en vigencia: 16 de febrero de 2005.(MIDAGRI,2005)

3.2.7. Ecosistemas acuáticos y su papel en el almacenamiento de carbono

Humedales, lagos y bofedales como sumideros de carbono

Los humedales son ecosistemas esenciales para el equilibrio ambiental, la economía y las comunidades, aunque su importancia sigue siendo subestimada tanto a nivel global como en el Perú. Esta falta de reconocimiento los hace vulnerables a amenazas como la contaminación, la conversión de tierras, la extracción ilegal de recursos y los impactos del cambio climático, que ponen en riesgo su existencia. Sin embargo, la reciente aprobación del Reglamento de la Ley N° 32099, a través del Decreto Supremo N° 002-2025-MINAM, marca un hito en la protección y gestión sostenible de estos ecosistemas en el país. (MINAM, 2025)

El reglamento introduce herramientas clave, como el Inventario Nacional de Humedales, que permitirá identificar, monitorear y gestionar estos ecosistemas de manera integral. Este instrumento será fundamental para priorizar acciones de conservación y restauración, especialmente en áreas críticas como los bofedales andinos y los manglares de Tumbes. Además, se establecen medidas para delimitar áreas protegidas, crear zonas de amortiguamiento, recuperar humedales degradados y fortalecer los mecanismos de control para asegurar el cumplimiento de la normativa. (MINAM, 2025)

Los humedales son vitales para la biodiversidad, albergando una gran variedad de especies y contribuyendo al equilibrio ecológico. Actúan como sumideros de carbono, ayudando a mitigar el cambio climático, y proporcionan servicios cruciales como el control de inundaciones, la purificación del agua y la protección contra tormentas. En Perú, estos ecosistemas ocupan aproximadamente 18 millones de hectáreas, distribuidas en las regiones andina, costera y amazónica. La Amazonía concentra la mayor extensión, con bosques inundables y pantanos, mientras que los bofedales destacan en los Andes y los manglares en la costa. (MINAM, 2024)

Además de sus funciones ambientales, los humedales ofrecen beneficios económicos

significativos. Proveen alimentos, medicinas y materiales para artesanías, además de ser bancos genéticos importantes para la agricultura y la conservación. Por ejemplo, el Lago Titicaca alberga más de 30 especies de peces. También tienen un gran potencial para el ecoturismo, como ocurre en la Reserva Nacional de Paracas, donde los humedales son tanto refugios ecológicos como atractivos turísticos.

Los humedales son ecosistemas que combinan características acuáticas y terrestres, caracterizados por la saturación prolongada del suelo con agua. Para ser considerados humedales, estos deben permanecer inundados al menos el 5% del periodo de crecimiento vegetal. Presentan una gran diversidad de hábitats, como riberas fluviales, estuarios, lagunas, pantanos y zonas intermareales, y están dominados por procesos anaeróbicos que favorecen plantas adaptadas a ambientes anegados. Su formación depende de factores como climas lluviosos, bajas temperaturas que reducen la evaporación o condiciones geomorfológicas que favorecen el estancamiento del agua.

A nivel mundial, los humedales cubren entre 7 y 10 millones de km², representando entre el 6% y el 8% de la superficie terrestre, con mayor presencia en regiones boreales y templadas del hemisferio norte. En Perú, el Ministerio del Ambiente define estos ecosistemas como áreas cubiertas de agua, ya sean naturales o artificiales, dulces, salobres o saladas, que albergan comunidades biológicas esenciales para diversos servicios ecosistémicos. El país cuenta con importantes extensiones de humedales, incluidos 13 Sitios Ramsar prioritarios, que suman 7,953,191 hectáreas. Estos abarcan lagos, lagunas, bofedales, aguajales y pantanos amazónicos, aunque su distribución es desigual en el tiempo y el espacio, destacando a Perú entre los 20 países con mayor disponibilidad de recursos hídricos.(MIDAGRI, 2015)

Los humedales, esenciales para el equilibrio ecológico global, abarcan una gran diversidad de ecosistemas. De acuerdo con la Convención Ramsar, estos se clasifican en 42 tipos, agrupados en tres categorías principales: marinos y costeros, continentales, y artificiales.

Algunos sitios pueden incluir humedales de varias categorías, especialmente si son extensos. El sistema de clasificación Ramsar, basado en la geomorfología y el régimen hídrico, es considerado más preciso y adecuado que otros métodos existentes.

En el contexto del Perú, el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2015) reconoce varios tipos de humedales, que incluyen:

- Humedales costeros: como manglares, lagunas, estuarios, albuferas, deltas, oasis y pantanos.
- Humedales andinos: como lagos, lagunas, bofedales, manantiales, puquios, turberas y humedales de páramos.
- Humedales amazónicos: incluyendo lagos, complejos de orillales, pantanos amazónicos (como aguajales, renacales, pungales), bosques de tahuampa y sabanas inundables.

Importancia de los humedales

Los humedales son ecosistemas esenciales para la vida humana y natural, destacando por su alta productividad y los múltiples beneficios que ofrecen. Tres cuartas partes de la población mundial han dependido o dependen directamente de estos ecosistemas, que proporcionan agua para consumo, agricultura, minería y energía, además de beneficios indirectos como turismo, recreación y valor estético. Ecológicamente, son fundamentales para la biodiversidad, albergando más de 10,000 especies de peces, 4,000 de anfibios y numerosas aves acuáticas. También actúan como sumideros de carbono, mitigando el cambio climático gracias a la baja descomposición de materia orgánica en sus suelos inundados, y depuran aguas contaminadas. (Ramsar, 2020)

Sin embargo, los humedales enfrentan graves amenazas debido a la sobreexplotación, contaminación, conversión de hábitats y cambios en su dinámica natural. Entre 1993 y 2007, su extensión global disminuyó drásticamente, especialmente en regiones tropicales como América del Sur y el Sureste asiático, con pérdidas superiores al 50% de su área original. En

países como Nueva Zelanda, se ha perdido hasta el 90%. Las principales presiones incluyen el uso intensivo del agua, la eutrofización, la introducción de especies invasoras y actividades como el drenaje y el pastoreo intensivo, que no solo reducen la biodiversidad, sino que también liberan CO₂, agravando el cambio climático. Su conservación es vital para proteger la biodiversidad y regular el ciclo del carbono.

Los humedales son una solución natural clave frente al cambio climático, actuando como sumideros de carbono altamente efectivos. Ecosistemas como turberas, manglares y praderas marinas capturan y almacenan el doble de carbono que todos los bosques del planeta. Sin embargo, su destrucción o drenaje libera grandes cantidades de carbono a la atmósfera, exacerbando el problema climático. Las turberas, por ejemplo, cubren solo el 3% de la superficie terrestre, pero almacenan el 30% del carbono terrestre, cuatro veces más que todos los bosques del mundo.(Ramsar, 2001.)

Temperatura, pH y contenido de oxígeno

Los parámetros clave para evaluar la calidad del suelo, que incluyen aspectos físicos, físico-químicos, químicos y microbiológicos. Entre los primeros destacan la estabilidad de agregados, el pH y la conductividad eléctrica, mientras que los químicos se centran en nutrientes y fracciones de carbono. En el ámbito microbiológico, son relevantes el carbono de biomasa microbiana, la respiración microbiana y las actividades enzimáticas, que reflejan el estado general del suelo y su capacidad para sostener procesos metabólicos esenciales. (Parkin, T. B., et al, 2016)

La actividad respiratoria del suelo, medida a través de la producción de CO₂, es un indicador dinámico de la actividad metabólica microbiana, influenciada por factores como el uso del suelo, la cobertura vegetal y condiciones ambientales. La actividad deshidrogenasa, vinculada a células viables, también es un marcador clave de la actividad microbiana total. Sin embargo, evaluar esta actividad es complejo debido a la diversidad de comunidades

microbianas y las múltiples interacciones en el suelo, que pueden variar según el ecosistema o condiciones externas.

Diversos factores, como temperatura, humedad, PH, nutrientes y materia orgánica, regulan la actividad microbiana y enzimática en el suelo. Estos microorganismos son fundamentales para los ciclos biogeoquímicos y la fertilidad del suelo, pero su respuesta rápida a cambios ambientales dificulta interpretar efectos específicos debido a la alta variabilidad de factores involucrados. (Fanin, N., et al, 2020)

En este contexto, se propone estudiar cómo tres variables ambientales clave—temperatura, humedad y PH—influyen en la actividad microbiana bajo condiciones controladas, analizando sus interacciones y efectos cruzados. (Ramos Vásquez & Dávila, 2008)

Naturaleza en los humedales

Históricamente, los humedales han sido fundamentales para las culturas andinas, utilizados para actividades como la ganadería de camélidos y el cultivo de papas, oca y quinua. Sin embargo, actualmente enfrentan amenazas como la contaminación minera, el sobrepastoreo, la extracción de turba y la alteración de cuencas. Estos factores, junto con la pérdida de prácticas ancestrales de manejo, contribuyen a la degradación de estos ecosistemas. (Salvador Perez María & Cano Echevarría, 2013.)

Los humedales altoandinos constituyen ecosistemas de alta montaña que albergan una riqueza biológica excepcional, a pesar de las duras condiciones climáticas que los caracterizan, como bajas temperaturas, radiación solar intensa y escasa disponibilidad de oxígeno. En estos ecosistemas se desarrolla una diversidad de especies endémicas y altamente especializadas, tanto de flora como de fauna, que han evolucionado para adaptarse a ambientes extremos. Entre la vegetación predominante se encuentran especies adaptadas a suelos anegados y fríos, como los juncos y totoras, destacando *Juncus arcticus* var. *andicola* y *Scirpus californicus*, así como plantas acuáticas como *Crassula venezuelensis*. En zonas con menor drenaje se observa una

mayor presencia de géneros como *Carex*, *Juncus* y *Scirpus*, mientras que a altitudes superiores a los 4.000 metros sobre el nivel del mar dominan las especies pulviniformes, especialmente *Distichia muscoides*, que forman estructuras de cojín y ayudan a conservar la humedad del suelo. La fauna asociada a estos humedales es igualmente diversa e incluye especies emblemáticas como la vicuña, el gato andino y el puma, así como una variedad de aves altoandinas. Entre estas últimas destacan el suri (ñandú andino), perdices, y especialmente los flamencos altoandinos, como *Phoenicoparrus andinus* y *Phoenicoparrus jamesi*. Además, en cuerpos de agua más permanentes habitan peces endémicos como *Orestias* y *Trichomycterus*, adaptados a la escasa oxigenación y a temperaturas extremas. Una forma particular de humedal altoandino es los oconales, zonas húmedas alimentadas por el deshielo de glaciares y por filtraciones subterráneas. Estas áreas retienen agua durante la mayor parte del año, favoreciendo la formación de suelos hidromórficos ricos en materia orgánica. La lenta descomposición de plantas como las ciperáceas da lugar a la acumulación de turba, un recurso natural valioso pero vulnerable a la explotación desmedida. (Mamani Mamani & García, 2014)

Históricamente, estos humedales han sido clave para las culturas andinas, ya que han permitido el desarrollo de prácticas agrícolas tradicionales —como el cultivo de papa, quinua y oca— y la crianza de camélidos sudamericanos. Estos usos sostenibles, basados en el conocimiento ancestral, contribuían a la conservación del equilibrio ecológico. Sin embargo, en las últimas décadas, estas prácticas se han ido perdiendo debido a la presión de actividades extractivas y al abandono del manejo tradicional.

Actualmente, los humedales altoandinos enfrentan múltiples amenazas, entre ellas la contaminación por actividades mineras, el sobrepastoreo, la extracción no regulada de turba, la alteración del flujo hídrico en las cuencas, y el cambio climático. Estas presiones provocan procesos de degradación progresiva que afectan tanto la biodiversidad como los servicios ecosistémicos que proveen.

Clasificación y reconocimiento internacional:

En el marco de los Convenios Internacionales, particularmente la Convención Ramsar sobre los Humedales de Importancia Internacional, estos ecosistemas pueden ser clasificados dentro de varias categorías:

- M (Humedales de alta montaña): incluye bofedales y oconales andinos, caracterizados por su altitud, clima frío y vegetación especializada.
- U (Humedales continentales permanentes): cuando estos humedales conservan agua todo el año.
- Va (Pastizales inundables): en referencia a áreas cubiertas por gramíneas y plantas herbáceas adaptadas a inundaciones estacionales.
- Ts (Turberas de montaña): incluyen zonas con acumulación significativa de turba, como ocurre en muchos bofedales altoandinos.

Además, los humedales altoandinos cumplen con criterios ecológicos de Ramsar relacionados con la presencia de especies vulnerables, hábitats de aves migratorias, funciones hidrológicas esenciales y conservación de especies endémicas. Por tanto, muchos de ellos pueden y deben ser considerados como Humedales de Importancia Internacional, lo que permitiría promover su conservación y gestión sostenible bajo el respaldo de la comunidad internacional. (Ransar, 2015)

Impacto de actividades humanas

Los humedales son ecosistemas fundamentales para el equilibrio ambiental, sin embargo, actualmente enfrentan una creciente presión debido a diversas actividades humanas que han acelerado su deterioro. Factores como la urbanización acelerada, el cambio en el uso del suelo, la contaminación hídrica, y la explotación irracional de los recursos naturales han desencadenado una crisis ecológica que amenaza su existencia a nivel global.

Estudios recientes indican que cerca del 40% de los humedales del planeta ya han

desaparecido, y lo más alarmante es que su tasa de desaparición es aproximadamente tres veces mayor que la de los bosques. Esta pérdida acelerada está directamente relacionada con prácticas humanas insostenibles, que transforman estos ecosistemas en áreas urbanizadas o agrícolas, destruyendo su capacidad de auto regulación y reduciendo severamente la biodiversidad que albergan.

Uno de los problemas más graves es la contaminación del agua, ocasionada por el vertido incontrolado de aguas residuales domésticas e industriales, así como por el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas en la agricultura, que terminan filtrándose hacia los cuerpos de agua. Este tipo de contaminación altera las propiedades físico-químicas del agua, comprometiendo su calidad y afectando directamente a las especies acuáticas y semiacuáticas. A esto se suman los efectos del cambio climático, como el aumento de temperaturas y las alteraciones en los ciclos hidrológicos, que reducen la disponibilidad de agua y agravan el estrés ambiental sobre los humedales.(ANA, 2024)

En el contexto urbano, los humedales cumplen funciones clave como la regulación de inundaciones, actuando como amortiguadores naturales que retienen el exceso de agua en temporadas lluviosas, y reduciendo así los riesgos para las poblaciones humanas. No obstante, muchas ciudades han expandido su infraestructura sobre estos ecosistemas, ignorando su valor ecológico y convirtiéndolos en zonas pavimentadas, canales de desagüe o basureros. Esta transformación no solo anula sus funciones naturales, sino que aumenta la vulnerabilidad de las ciudades ante fenómenos como inundaciones y sequías extremas.

Las investigaciones demuestran que los humedales que mejor conservan sus funciones ecológicas son aquellos menos afectados por la urbanización y el desarrollo no planificado. Esto pone en evidencia la necesidad de proteger las áreas húmedas remanentes, promoviendo políticas de conservación integradas que reconozcan su importancia para la biodiversidad, el ciclo del agua, la captura de carbono y la seguridad ambiental.

Es esencial cambiar la visión tradicional que considera a ríos, quebradas y humedales como simples infraestructuras de drenaje, y en su lugar, reconocerlos como ecosistemas vivos y dinámicos, cuyo equilibrio depende de una gestión integral de las cuencas hidrográficas. Para ello, se requiere implementar estrategias de conservación que articulen el conocimiento científico con la planificación urbana, fomentando un desarrollo que respete los límites ecológicos y que valore los beneficios que estos ecosistemas aportan a la sociedad.

La desaparición de los humedales representa una amenaza crítica tanto para la salud del medio ambiente como para la calidad de vida humana. Su conservación ya no es una opción, sino una necesidad urgente y prioritaria, que exige acciones coordinadas y multisectoriales, con un enfoque de sostenibilidad, equidad y responsabilidad intergeneracional.

En las ciudades, los humedales son cruciales para amortiguar inundaciones al actuar como zonas naturales de protección. Sin embargo, el desarrollo urbano sobre estos ecosistemas pone en riesgo tanto su función ecológica como la seguridad humana. Los humedales mejor conservados son aquellos menos afectados por la urbanización, destacando la importancia de protegerlos para mantener su biodiversidad y funciones naturales.

Es fundamental reconocer que ríos y arroyos no son simples canales de drenaje, sino ecosistemas dinámicos que requieren una gestión integral de las cuencas. Para garantizar su sostenibilidad, es urgente adoptar medidas que combinen la conservación de los humedales con una planificación urbana responsable y prácticas sostenibles que respeten su valor ecológico y social. La pérdida de estos ecosistemas representa una grave amenaza para el medio ambiente y la calidad de vida humana, lo que subraya la necesidad de actuar de manera inmediata y coordinada.(UNLP, 2017)

3.2.8. Caracterización de las lagunas e impacto en vegetación

Las lagunas altoandinas, como parte esencial de los ecosistemas acuáticos de montaña, juegan un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad y en la dinámica ecológica

de las zonas circundantes. Estos cuerpos de agua naturales no solo actúan como refugios críticos para la fauna silvestre, sino que también sostienen una amplia diversidad de especies vegetales, muchas de ellas altamente especializadas y adaptadas a las condiciones húmedas generadas por la presencia constante de agua.

El entorno inmediato de las lagunas suele caracterizarse por una vegetación ribereña abundante, compuesta por plantas acuáticas, hidrófilas y semiacuáticas, cuya supervivencia depende directamente de la humedad del suelo y del microclima generado por el espejo de agua. Este tipo de vegetación incluye ciperáceas, juncáceas, totoras y algas, entre otras, las cuales no solo contribuyen a la estabilidad ecológica del sistema, sino que también sirven de hábitat y fuente de alimento para numerosas especies animales, incluyendo aves migratorias, anfibios, insectos y mamíferos nativos. Rosenzweig, C., et al. (2001).

Como señalan Rosenzweig et al. (2001), las lagunas generan condiciones ambientales particulares que modifican el ecosistema inmediato, actuando como creadoras de microclimas. Al aumentar la humedad relativa del ambiente y mantener temperaturas más estables, estas masas de agua permiten que se desarrollen especies que no prosperarían en zonas secas aledañas. En este sentido, las plantas que requieren altos niveles de humedad o que dependen de suelos permanentemente saturados encuentran en los bordes de las lagunas un entorno óptimo para crecer. A su vez, esta vegetación contribuye al ciclo del carbono, al fijar CO₂ atmosférico y al reducir la erosión del suelo.

Otro aspecto fundamental es el rol regulador que cumplen las lagunas sobre el clima local y regional, como lo destacan Sala et al. (2000). La presencia de cuerpos de agua contribuye a moderar las temperaturas extremas, tanto en temporadas de calor como en épocas frías. Este efecto regulador se debe a la alta capacidad calorífica del agua, que absorbe calor durante el día y lo libera lentamente por la noche, ayudando a evitar fluctuaciones térmicas bruscas. Además, la evaporación que se produce en la superficie de la laguna incrementa la

humedad del aire, lo cual puede modificar patrones de precipitación locales y estacionales, influyendo así en los ciclos ecológicos de regiones más amplias.

En suma, las lagunas no deben ser vistas únicamente como depósitos de agua, sino como sistemas ecológicos complejos, con funciones claves en la regulación climática, la conservación de la biodiversidad vegetal y animal, y el mantenimiento de procesos ecológicos fundamentales. Su alteración por actividades humanas como el desvío de aguas, la contaminación, o la expansión urbana y agrícola puede desencadenar una serie de efectos en cascada, afectando no solo a la vegetación inmediata, sino también al clima, a la disponibilidad de agua y al equilibrio ecológico de la región.(Adrian et al., 2009)

Composición de la vegetación hidrofílica

La vegetación hidrofílica está adaptada a ambientes con abundante agua, como suelos saturados o zonas inundadas. Estas plantas han desarrollado características morfológicas y fisiológicas únicas para sobrevivir en condiciones de alta humedad o incluso bajo el agua. Entre sus adaptaciones destacan raíces especializadas para absorber nutrientes en suelos encharcados, estructuras que facilitan la flotación o emergencia sobre el agua, y mecanismos para tolerar la falta de oxígeno (anoxia), común en entornos acuáticos.

Este tipo de vegetación es típica de ecosistemas como lagos, pantanos, humedales y riberas de ríos. Incluye especies flotantes, emergentes y ribereñas, como juncos, cañas y lirios. Además de sus adaptaciones, estas plantas cumplen funciones ecológicas clave: estabilizan el suelo, purifican el agua y proporcionan hábitat para diversas especies animales. (Keddy, P. A. (2000).)

Las comunidades de vegetación hidrofílica también regulan el ciclo del agua, favorecen la infiltración y reducen la erosión costera. La diversidad y distribución de estas plantas depende de factores como el tipo de agua (dulce o salada), el clima y la profundidad, lo que influye en la composición de los ecosistemas donde se encuentran. (Van der Valk, A. G. (2005))

Las especies vegetales presentan distintos niveles de adaptación a las condiciones de los humedales. Se puede clasificar estas plantas en categorías según su probabilidad de encontrarse en humedales:

- Obligatorias de Humedal (OBL): Plantas que casi siempre se encuentran en humedales (más del 99% de probabilidad). Ejemplos incluyen lenteja de agua, nenúfares, espadaña y juncos.
- Facultativas de Humedal (FACW): Especies que generalmente están en humedales (67%-99%), pero ocasionalmente pueden crecer fuera de ellos.
- Facultativas (FAC): Plantas con igual probabilidad de estar en humedales o áreas no húmedas (34%-66%). Ejemplos son el arce rojo y la hiedra venenosa.
- Facultativas de Tierras Altas (FACU): Predominan en zonas no húmedas (67%-99%), aunque rara vez aparecen en humedales (1%-33%).
- Obligatorias de Tierras Altas (UPL): Se encuentran casi exclusivamente en áreas secas (más del 99%). Ejemplos incluyen el pino blanco y la hiedra terrestre.

Estas categorías ayudan a identificar y comprender la distribución de especies vegetales en diferentes ambientes, como los humedales y tierras altas.(VERMONT, 2015)

La vegetación hidrófila incluye plantas adaptadas a humedales o zonas sujetas a inundaciones, siendo altamente influenciada por actividades humanas como desecamientos para agricultura, ganadería y construcción de infraestructuras acuícolas. Esta vegetación se encuentra en todos los climas y desde el nivel del mar hasta los 4000 metros de altitud.

Entre ellas tenemos selva de galería, presente en áreas húmedas junto a ríos y arroyos, con especies como *Pachira aquatica* y *Ficus spp.* También está el bosque de galería, compuesto por árboles como el sabino (*Taxodium mucronatum*), sauces, fresnos y álamos, que crecen en las márgenes de cuerpos de agua bajo condiciones de alta humedad. En regiones áridas, la vegetación puede incluir mezquites (*Prosopis spp.*), aunque muchas de estas comunidades

están degradadas. (Correa et al., 2008)

Por otro lado, la vegetación halófila hidrófila prospera en suelos salinos, como en cuencas áridas (Cuatro Ciénegas) o zonas costeras. Los lagos, formados por fenómenos geológicos como fallas o cráteres volcánicos, también albergan vegetación específica. Finalmente, las planicies inundables, áreas adyacentes a cuerpos de agua que se cubren periódicamente, son visibles en imágenes satelitales y juegan un papel clave en estos ecosistemas. (Paz et al., 2020)

3.2.9. Especies predominantes en las lagunas en Cusco-Perú

Inventario de flora: Las lagunas altoandinas de la región de Cusco constituyen ecosistemas complejos y diversos, que albergan una notable variedad de especies vegetales tanto dentro de los cuerpos de agua como en sus márgenes inmediatas. La flora lacustre cumple funciones ecológicas esenciales, como el filtrado de sedimentos, la regulación del microclima, la provisión de alimento y refugio para la fauna, así como la estabilización de los suelos en zonas húmedas.

De acuerdo con estudios anteriores, los primeros inventarios florísticos realizados en lagunas altoandinas peruanas —incluidas algunas en la región Cusco— reportaban una cantidad relativamente limitada de especies acuáticas vasculares, generalmente entre 3 y 15 especies, que se clasificaban en función de su hábito de crecimiento: emergentes, sumergidas o flotantes. Este enfoque, sin embargo, no tomaba en cuenta la vegetación de las zonas circundantes a las lagunas, como las laderas, humedales adyacentes o áreas de transición ecológica, lo que limitaba la comprensión real de la diversidad vegetal presente en estos ecosistemas. (Aquino Flores & Ravilla Muñoz, 2022)

Avances metodológicos y estudios más recientes han permitido ampliar este registro. Investigaciones posteriores no solo incrementaron el número de especies identificadas, sino que también propusieron una clasificación más detallada, distinguiendo entre formas de vida arbóreas, arbustivas y herbáceas, lo que permitió caracterizar mejor la estructura y complejidad

de la vegetación presente.

Particularmente revelador ha sido el estudio reportado por el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2015a), que documentó un total de 206 especies vegetales asociadas a lagunas de Cusco, incluyendo no solo plantas estrictamente acuáticas, sino también aquellas que se desarrollan en zonas ribereñas y de transición. Esta cifra evidencia una riqueza florística significativamente mayor a lo previamente registrado, y pone de manifiesto la importancia ecológica de estos ecosistemas lacustres como reservorios de biodiversidad andina.

La flora de estas lagunas incluye especies de los géneros *Carex*, *Juncus*, *Scirpus* y *Eleocharis*, representativas de ambientes húmedos, junto con otras especies herbáceas nativas y endémicas adaptadas a condiciones específicas de altitud, humedad y radiación solar. La presencia de esta diversidad vegetal no solo es un indicador de la salud ecológica de los ecosistemas acuáticos, sino que también sostiene una amplia gama de interacciones ecológicas, como la polinización, la dispersión de semillas y la provisión de hábitats para insectos, aves y anfibios. (Aquino Flores & Ravilla Muñoz, 2022)

Este notable incremento en el número de especies registradas subraya la necesidad de continuar realizando inventarios botánicos sistemáticos y actualizados, que permitan tener un conocimiento más profundo del estado de conservación de estos ecosistemas, y que sirvan como base para el diseño de estrategias de manejo sostenible y restauración ecológica. Asimismo, estos hallazgos demuestran que los ecosistemas lacustres del Cusco no deben ser subestimados, ya que albergan una riqueza biológica considerable, muchas veces no reconocida ni protegida adecuadamente en los instrumentos de ordenamiento territorial y planificación ambiental. (MINAM, 2015)

Inventario de fauna

El estudio realizado por Walsh Perú (2007) ofrece un valioso aporte al conocimiento de la fauna silvestre asociada a los ecosistemas lacustres altoandinos, al proporcionar un

inventario detallado de las especies que habitan o interactúan en estos entornos acuáticos. Aunque en términos generales la diversidad faunística registrada es moderada, los hallazgos destacan por su relevancia ecológica y por evidenciar la necesidad de fortalecer el monitoreo de estos hábitats. (Walsh Perú, 2007)

En el grupo de mamíferos silvestres, el estudio documentó la presencia de una sola especie: *Oligoryzomys destructor*, un pequeño roedor andino que habita zonas de vegetación densa cerca de cuerpos de agua. Aunque la baja diversidad de mamíferos registrada puede deberse a la altitud y las condiciones climáticas extremas de estos ecosistemas, también podría reflejar limitaciones en los métodos de muestreo o la posible perturbación del hábitat por actividades humanas.

Por otro lado, el grupo de aves se mostró mucho más representativo, se identificaron 40 especies, lo que significa un incremento de 8 especies respecto a estudios anteriores, que solo habían registrado 32. Este aumento evidencia una mayor riqueza avifaunística y sugiere que los lagos y lagunas funcionan como hábitats críticos para la avifauna altoandina, incluyendo especies residentes y migratorias. Muchas de estas aves dependen de las zonas lacustres para alimentarse, anidar o descansar durante sus rutas migratorias, lo cual resalta el papel fundamental que juegan estos cuerpos de agua en la conectividad ecológica regional.

En cuanto a reptiles, el estudio identificó dos especies, una cifra que, si bien es baja, resulta coherente con las condiciones de altitud, temperatura y humedad características de los ecosistemas andinos, donde los reptiles suelen estar menos representados. Del mismo modo, se registraron cuatro especies de anfibios, grupo particularmente sensible a la degradación del hábitat y a la contaminación del agua. La presencia de estos anfibios puede interpretarse como un indicador de la calidad ambiental del ecosistema, ya que estas especies requieren ambientes acuáticos limpios y estables para su desarrollo.

En relación con los peces, el inventario documentó tres especies: una nativa y dos

exóticas, lo cual refleja un fenómeno común en los lagos altoandinos, donde especies foráneas han sido introducidas con fines recreativos o productivos, como la pesca. Si bien la introducción de especies exóticas puede tener beneficios económicos a corto plazo, también representa una amenaza para las especies nativas, ya que compiten por recursos, alteran las cadenas tróficas y pueden introducir enfermedades.

En conjunto, este inventario de fauna confirma que, a pesar de las condiciones ambientales adversas, las lagunas altoandinas albergan una fauna significativa y funcionalmente importante. Sin embargo, también pone de relieve la fragilidad de estos ecosistemas frente a la intervención humana, así como la necesidad de continuar con estudios de monitoreo, manejo adaptativo y estrategias de conservación que consideren no solo la flora, sino también la fauna en toda su complejidad. Walsh Perú. (2007).

Las características físico-químicas de las lagunas altoandinas:

Las características ya mencionadas del agua en las lagunas altoandinas son fundamentales para comprender el estado de salud de estos ecosistemas y su capacidad para albergar vida. Diversos estudios han mostrado que los parámetros básicos del agua, como la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica, el oxígeno disuelto y la transparencia, determinan en gran medida la composición biológica del ecosistema lacustre y su equilibrio ecológico. (Gertler et al., 2015.)

En el caso particular de la temperatura, uno de los indicadores más relevantes para la dinámica ecológica acuática, se han observado valores relativamente constantes en los últimos años. Investigaciones previas reportaron temperaturas de 18°C (Acurio, 1975), 19°C (Jara, 1975), y 17.84°C (Tucto, 2014). En el estudio actual, se registró una temperatura promedio de 20.3 °C, lo que evidencia una ligera variación ascendente, posiblemente influenciada por cambios estacionales, variabilidad climática o el calentamiento global. A pesar de esta fluctuación, los valores obtenidos se mantienen dentro de un rango considerado óptimo para el

desarrollo de la biocenosis lacustre, especialmente en totorales y juncuales altoandinos, donde la totora (*Schoenoplectus californicus* subsp. *tatora*) y otras macrófitas emergentes constituyen el hábitat estructural clave para la coexistencia armónica de poblaciones de flora y fauna.

Estos rangos térmicos favorecen la existencia de organismos acuáticos sensibles, como fitoplancton, macroinvertebrados, anfibios y peces, que dependen de la cobertura y protección que ofrecen los totorales y juncuales para su reproducción, alimentación y refugio. La estabilidad térmica también ayuda a mantener la solubilidad del oxígeno en el agua, lo que es crucial para la respiración de las especies aeróbicas y para evitar fenómenos de anoxia que podrían afectar la cadena trófica acuática.

Las lagunas del Perú, particularmente las ubicadas en la región andina, no solo se destacan por sus características físicas, sino también por su inmenso valor ecológico y biológico. Son ecosistemas estratégicos que desempeñan funciones clave en el ciclo hidrológico (regulación del flujo de agua, recarga de acuíferos, retención de sedimentos y atenuación de avenidas), y albergan totorales extensos que actúan como reservorios naturales de biodiversidad, brindando hábitat a una amplia gama de especies vegetales y animales, muchas de ellas endémicas o en riesgo de extinción.

La composición físico-química del agua varía según factores geográficos y climáticos (altitud, geología del sustrato, tipo de agua y condiciones locales). Por ejemplo, las lagunas altoandinas con juncuales y totorales dominantes tienden a tener temperaturas más frías, niveles más bajos de oxígeno disuelto y menor conductividad, mientras que aquellas en regiones bajas o amazónicas pueden presentar mayor diversidad biológica pero también estar más expuestas a alteraciones humanas.

En conclusión, los estudios físico-químicos del agua en lagunas no solo permiten caracterizar su estado actual, sino que también constituyen una herramienta esencial para evaluar su capacidad de resiliencia frente al cambio climático y la intervención humana. El

monitoreo constante de estos parámetros es clave para implementar estrategias efectivas de conservación, restauración y uso sostenible de estos ecosistemas, cuyo deterioro pondría en riesgo no solo la biodiversidad que sustentan, sino también los servicios ecosistémicos que proveen a las comunidades humanas en su entorno Tucto, D. (2014).

Las lagunas en Perú son ecosistemas de gran biodiversidad y valor ecológico, fundamentales para regular el ciclo hídrico, albergar diversas especies de flora y fauna, y conservar recursos naturales en zonas altas y bajas. Su composición varía según la ubicación geográfica, altitud, tipo de agua (dulce o salada) y clima. Son especialmente relevantes para la preservación de la biodiversidad en las regiones altoandinas y amazónicas.

3.2.10. Especies predominantes en lagunas altoandinas del Perú

Entre las plantas acuáticas más comunes en las lagunas altoandinas se encuentran las *Schoenoplectus californicus* (totora) y la *Typha angustifolia*.

La totora

Científicamente conocida como *Schoenoplectus californicus*, es una de las especies vegetales más emblemáticas de los humedales y lagunas altoandinas del Perú, especialmente en zonas donde los cuerpos de agua presentan poca profundidad. Esta planta acuática perenne pertenece a la familia de las ciperáceas y suele crecer en agrupaciones densas conocidas como juncuales o totorales, los cuales cumplen una función ecológica crítica en estos ecosistemas. Desde una perspectiva ecológica, la totora actúa como estabilizadora natural de las orillas de lagunas, ayudando a prevenir la erosión causada por el viento, el oleaje o el pastoreo de animales. Sus raíces fibrosas y rizomatosas se entrelazan firmemente con el suelo húmedo, lo que fortalece la estructura del sustrato y mantiene la integridad del borde lacustre. Además, estos juncuales densos desempeñan un papel fundamental en la filtración de contaminantes, ya que las totoras son capaces de absorber nutrientes en exceso (como nitrógeno y fósforo) y retener sedimentos, contribuyendo así a la purificación natural del agua.

La totora también provee hábitats esenciales para la fauna acuática y ribereña. Muchas especies de aves acuáticas —como garzas, patos andinos, y zambullidores— utilizan los totorales para anidar y protegerse de depredadores. Asimismo, diversos peces y anfibios encuentran refugio entre los tallos sumergidos, utilizándolos como zonas de reproducción o alimentación. De esta manera, los totorales favorecen la biodiversidad estructural y funcional del ecosistema lacustre. Además de su importancia ecológica, la totora posee un alto valor cultural y económico para diversas comunidades andinas que habitan en los alrededores de lagunas y humedales. Sus tallos largos, resistentes y livianos han sido utilizados tradicionalmente para la elaboración de una variedad de elementos utilitarios y arquitectónicos, como techos, cercas, esteras, camas, utensilios de uso diario e incluso embarcaciones artesanales (como las famosas balsas en el lago Titicaca). Esta relación ancestral entre el ser humano y la totora refleja un modelo de uso sostenible de los recursos naturales, que ha perdurado durante generaciones. (Nacional et al., 2014)

En este sentido, la totora no solo representa una especie clave para el equilibrio ecológico de los ecosistemas lacustres, sino también un símbolo del vínculo entre la naturaleza y la cultura andina. Su conservación resulta esencial no solo por sus funciones ambientales, sino también por su aporte a la identidad cultural, la economía local y la soberanía alimentaria y material de comunidades que dependen directamente de estos ecosistemas. *Schoenoplectus californicus* es mucho más que una planta acuática: es un elemento estructurante de los humedales altoandinos, una fuente de vida y sustento para muchas especies y personas, y un claro ejemplo de cómo la naturaleza y la cultura pueden coexistir armónicamente si se mantiene un enfoque de conservación integral. (MINAN, 2024)

***Typha angustifolia* (totora):**

De acuerdo a la revista flores y plantas, “se resalta que es una planta perenne y rizomatosa que tiende a expandirse con facilidad y en condiciones óptimas puede superar

fácilmente el metro de altura. También es una planta de crecimiento rápido, muy rústica y al desarrollarse fácilmente por rizomas, la podemos catalogar como planta invasora. Por ello debemos controlar que no invada el espacio de otras plantas que también deseamos preservar. Su multiplicación es muy sencilla mediante la división de matas, fraccionando sus rizomas. (Floresyplantas.net. , 2019)

Figura. 4

Estructura Ilustración botánica del totoral (Typha sp.)



Nota: Imagen recuperada de Wikipedia Tifáceas

Los juncos:

Pertenecientes al género *Juncus*, son plantas herbáceas perennes que se desarrollan principalmente en los bordes de lagunas, pantanos y humedales, especialmente en zonas de altitud elevada, con climas fríos y suelos constantemente saturados de agua. Estas especies, reconocidas por sus tallos cilíndricos, largos y flexibles, son componentes fundamentales de la vegetación hidrófila que caracteriza a los ecosistemas acuáticos andinos. Desde una perspectiva ecológica, los juncos cumplen un rol esencial como reguladores físicos y biológicos en las zonas de transición entre el agua y la tierra firme. (Ramsar, 2020)

Su sistema radicular denso y profundo permite la retención de sedimentos y actúa como una barrera natural contra la erosión del suelo, especialmente en márgenes inestables o

expuestos al oleaje y a la escorrentía pluvial. Esta función es vital para mantener la estabilidad morfológica de las orillas de lagunas y evitar la pérdida progresiva de suelo fértil. Además, los juncos contribuyen a mejorar la calidad del agua, funcionando como filtros naturales. Son capaces de absorber nutrientes excesivos, como el nitrógeno y el fósforo, y de atrapar contaminantes suspendidos, ayudando a reducir la eutrofización del agua y favoreciendo un ambiente más limpio y saludable para otras formas de vida. También juegan un papel importante en la oxigenación del suelo anegado, al facilitar el intercambio de gases a través de sus tejidos, beneficiando así a organismos subacuáticos y microorganismos del sustrato.

La vegetación de juncos sirve como refugio y zona de alimentación para una variedad de especies animales, entre ellas aves acuáticas, anfibios, insectos y peces pequeños, que encuentran en los juncales un microhábitat protegido contra depredadores y condiciones climáticas extremas. Su estructura vertical también proporciona áreas de anidamiento y descanso para especies migratorias y residentes. Aunque su uso cultural es más limitado en comparación con la totora o la espadaña, algunas comunidades rurales han empleado los tallos de juncos en la elaboración de artesanías, sogas o estructuras simples, y en algunos casos, como material de cobertura vegetal para suelos agrícolas o para mejorar la absorción de humedad en corrales de animales. Estas plantas no solo aportan a la integridad ecológica y funcional de los ecosistemas lacustres, sino que además representan un elemento clave para la resiliencia ambiental, especialmente frente a procesos de degradación como el cambio climático, el sobrepastoreo o la contaminación hídrica. Su presencia es un indicador de buena salud ecológica en humedales altoandinos, y su conservación debe ser prioritaria en estrategias de gestión sostenible de lagunas y bofedales.

Las ciperáceas:

Particularmente aquellas del género *Cyperus*, son plantas herbáceas de ambientes húmedos que juegan un papel significativo en la dinámica ecológica de las lagunas altoandinas

y otros humedales. Estas especies están adaptadas a crecer en zonas encharcadas, suelos anegados o con alta saturación hídrica, condiciones que prevalecen en las orillas de cuerpos de agua como lagunas, pantanos y bofedales. Su estructura, compuesta por tallos triangulares y hojas delgadas y alargadas, les permite desarrollarse en condiciones donde otras plantas no podrían sobrevivir. Desde el punto de vista ecológico, las ciperáceas tienen una función esencial como facilitadoras de biodiversidad.

Al formar coberturas densas en los márgenes lacustres, crean microhábitats ideales para una amplia gama de fauna acuática, incluyendo insectos, crustáceos, anfibios y peces pequeños, que encuentran en esta vegetación un espacio seguro para refugiarse, reproducirse y alimentarse. También sirven como lugar de descanso y anidamiento para algunas especies de aves acuáticas que dependen de la vegetación marginal para sobrevivir en condiciones climáticas extremas. Además, las ciperáceas contribuyen a la estabilidad física y química del ecosistema acuático. Sus raíces ayudan a retener el suelo y los sedimentos, lo que disminuye la erosión de las orillas causada por el viento, el oleaje o las lluvias torrenciales. Esta función es particularmente importante en zonas de montaña, donde los suelos son frágiles y propensos a degradarse. Adicionalmente, estas plantas participan en la depuración del agua, ya que sus tejidos pueden absorber nutrientes como nitratos y fosfatos, ayudando a controlar procesos de eutrofización que comprometen la calidad del agua y el equilibrio ecológico. (Cronk & Fennessy, 2016)

Desde una perspectiva ecosistémica más amplia, las ciperáceas contribuyen a mantener la funcionalidad del humedal al intervenir en procesos como la formación de turba, la retención de humedad, y el almacenamiento de carbono en el suelo. En este sentido, su presencia fortalece la capacidad del ecosistema para resistir perturbaciones externas, como el cambio climático o el uso intensivo del suelo. Aunque su uso cultural no es tan difundido como en el caso de otras especies como la totora, las ciperáceas han sido ocasionalmente utilizadas por comunidades

rurales para forraje, cobertura vegetal o incluso en la elaboración de tejidos rústicos. Más allá de su aprovechamiento directo, su valor radica principalmente en el servicio ecológico que prestan como soporte de vida en los humedales.

En conclusión, las ciperáceas del género *Cyperus* son componentes clave en los ecosistemas de lagunas altoandinas. Aportan a la estabilidad ecológica, favorecen la biodiversidad y mejoran la calidad del agua, desempeñando múltiples funciones que sostienen la salud de estos ecosistemas frágiles. Su conservación resulta fundamental dentro de cualquier estrategia de gestión ambiental y restauración ecológica de humedales.

3.2.11. Fauna asociada a las lagunas

Las lagunas en Perú, tanto en la región andina como en la Amazonía, también son hábitats esenciales para una gran variedad de fauna. En las lagunas altoandinas, especies como el flamenco andino (*Phoenicoparrus andinus*), patos, y diversas especies de peces endémicos dependen de estos ecosistemas para su alimentación y reproducción. En la Amazonía, las lagunas son hábitats para peces como el *Arapaima gigas*, y diversas especies de reptiles, anfibios y aves migratorias. (Paredes, M. R., & Martínez, L. M. (2011).) Las lagunas en las regiones altoandinas como en la Amazonía, constituyen ecosistemas altamente productivos y funcionales, fundamentales para la conservación de la biodiversidad, la regulación del ciclo hidrológico, y el sostenimiento de actividades humanas. Estas masas de agua dulce no solo sirven como reservas naturales de agua, sino también como hábitats vitales para una variada y especializada fauna silvestre.

En los Andes peruanos, las lagunas situadas por encima de los 4,000 m s.n.m. albergan especies adaptadas a condiciones extremas de altitud, bajas temperaturas y radiación solar intensa. Entre las especies animales más representativas se encuentra el flamenco andino (*Phoenicoparrus andinus*), cuya presencia es un claro indicador de salud ambiental en estos

ecosistemas. Acompañan a esta especie diversas variedades de patos altoandinos, zambullidores, y aves migratorias que utilizan las lagunas como zonas de descanso, alimentación y reproducción.

Asimismo, las lagunas andinas albergan peces endémicos como los del género *Orestias*, que han evolucionado en condiciones particulares y que dependen de la calidad del agua y la vegetación acuática para completar su ciclo de vida. También se encuentran anfibios nativos, algunos de ellos en peligro de extinción, que utilizan estos cuerpos de agua como zonas de reproducción y refugio frente a depredadores y cambios climáticos extremos.

En la Amazonía peruana, las lagunas presentan una biodiversidad aún más exuberante. Especies emblemáticas como el arapaima (*Arapaima gigas*), uno de los peces de agua dulce más grandes del mundo, dependen de estos hábitats para reproducirse y desarrollarse. Las lagunas amazónicas también sostienen poblaciones de reptiles (caimanes, tortugas acuáticas), anfibios, y una amplia variedad de aves acuáticas y migratorias, haciendo de estos ecosistemas verdaderos refugios biológicos. (Best et al., 2007)

Las especies vegetales asociadas a estas lagunas cumplen funciones claves que benefician directamente a la fauna. Plantas como la totora (*Schoenoplectus californicus*) y la espadaña (*Typha latifolia*), al formar densas coberturas vegetales, no solo estabilizan las orillas y filtran el agua, sino que ofrecen refugio, alimento y sitios de anidación para diversas especies animales. Otras plantas como los juncos (*Juncus spp.*) y las ciperáceas (*Cyperus spp.*) también juegan un rol importante como reguladores del microclima y purificadores naturales del entorno lacustre.

Sin embargo, pese a su relevancia ecológica, las lagunas —al igual que otros tipos de humedales— están experimentando una rápida degradación a nivel global. Estudios recientes señalan que más del 50% de los humedales del planeta han desaparecido, y que su pérdida avanza a un ritmo tres veces mayor que el de los bosques. Las causas principales incluyen la

urbanización descontrolada, la contaminación por aguas residuales, pesticidas y metales pesados, el uso intensivo de agua para agricultura y minería, y la introducción de especies invasoras, todo lo cual altera las dinámicas ecológicas y reduce la biodiversidad.

En el caso de Perú, los humedales costeros y altoandinos son especialmente vulnerables. La fragmentación de hábitats, el drenaje de lagunas para expansión agrícola y la pérdida de vegetación nativa conducen a la liberación de carbono almacenado, lo que agrava el cambio climático y compromete la resiliencia del ecosistema. Además, estas alteraciones afectan directamente las redes tróficas, disminuyendo la disponibilidad de alimento para especies clave y debilitando las funciones naturales del humedal.

Finalmente, se estima que alrededor del 75% de la población mundial vive actualmente en zonas cercanas a humedales o en áreas que antes lo fueron, lo que subraya la necesidad urgente de gestionar y conservar estos ecosistemas estratégicos. En Perú, las lagunas no solo representan reservorios biológicos de valor incalculable, sino que también sostienen actividades como el turismo ecológico, el uso recreativo, y el suministro de agua para consumo humano, agrícola e industrial. (Ransar, 2018)

Las lagunas de la región de Cusco, son ecosistemas de gran valor ecológico debido a su alta biodiversidad y su papel clave en la regulación hídrica y conservación de especies. Ubicadas en zonas altoandinas y valles interandinos, estas lagunas albergan flora y fauna adaptadas a condiciones extremas de altitud (superiores a 4,000 msnm), frío, humedad y variaciones climáticas.

Entre las especies vegetales más representativas destaca la totora (*Schoenoplectus californicus*), fundamental para la estructura de estos ecosistemas. Esta planta forma densas formaciones en las orillas, estabiliza el suelo, previene la erosión, filtra el agua y proporciona hábitat y alimento para aves acuáticas, peces y otros animales. Otra especie clave es la espadaña (*Typha latifolia*), que crece en aguas poco profundas, protege los sedimentos, regula la

temperatura y ayuda a retener nutrientes.

En los márgenes menos profundos, plantas como los juncos (*Juncus spp.*) y las ciperáceas (*Cyperus spp.*) juegan un papel importante al purificar el agua, prevenir la erosión y ofrecer refugio y alimento a insectos y pequeños animales. A mayores altitudes, donde las condiciones son más extremas, predominan gramíneas resistentes como el ichu (**Festuca spp.*) y arbustos adaptados a heladas y fuertes vientos. (ANA, 2024)

Estos ecosistemas también son cruciales para la fauna local. Sirven de refugio y área de alimentación para aves migratorias como flamencos y patos, además de albergar peces endémicos y anfibios que dependen de las lagunas para completar su ciclo de vida.

Las lagunas altoandinas de Cusco son ecosistemas complejos y vitales que sostienen una gran diversidad de flora y fauna. Las plantas predominantes, como totoras, espadañas, juncos y ciperáceas, son esenciales para la conservación de estos ambientes, la regulación hídrica y el equilibrio ecológico de la región. (Tovar, J. (2010).)

Aproximadamente tres cuartos de la población mundial viven en áreas cercanas a humedales o en regiones que alguna vez lo fueron. Estos ecosistemas son altamente productivos y ofrecen múltiples beneficios, como el suministro de agua para uso residencial, agrícola, minero e industrial, además de su valor recreativo, turístico y estético.

Los humedales están entre los ecosistemas más amenazados del mundo. Desde 1993 hasta 2007, se registró una drástica reducción de su área global, especialmente en regiones tropicales como América del Sur y el Sudeste Asiático. Se estima que más del 50% de los humedales originales han desaparecido, con pérdidas significativas en países como Nueva Zelanda (90%), Estados Unidos (53%) y China (60%). Los humedales costeros son particularmente vulnerables, desapareciendo a una tasa anual del 1%. (Davidson, 2014)

Las principales causas de esta pérdida incluyen la conversión y fragmentación de hábitats, el sobreuso del agua (principalmente para agricultura, minería y uso doméstico), la

contaminación por nutrientes e industrias, y la introducción de especies invasoras. Estas actividades alteran las funciones de los ecosistemas, afectan las tramas tróficas y ponen en riesgo la biodiversidad. Además, la desecación y el drenaje de humedales liberan dióxido de carbono almacenado (Roa-García, M. D., & Brown, J. (2016).)

3.2.12. Características del suelo y su relación con el carbono almacenado

El carbono se almacena principalmente a partir de la descomposición de materia orgánica, como restos de plantas y animales, quedando retenido en formas estables como humus. La capacidad de almacenamiento depende de factores como el tipo de suelo, su textura, estructura, contenido de materia orgánica y las condiciones ambientales.

Los suelos de humedales, debido a su saturación en agua, tienen una alta capacidad para almacenar carbono, ya que la descomposición es más lenta en condiciones de inundación. Los suelos orgánicos, como los de turberas, son particularmente eficientes en retener grandes cantidades de carbono durante largos períodos. Sin embargo, prácticas como la agricultura intensiva, la deforestación o el drenaje de humedales reducen esta capacidad al alterar la estructura del suelo y acelerar la descomposición de la materia orgánica.

La temperatura y la humedad también influyen en el almacenamiento de carbono. En climas fríos y húmedos, como los de bosques boreales o humedales, la descomposición es más lenta, favoreciendo una mayor acumulación. En climas cálidos, la rápida descomposición reduce el almacenamiento a largo plazo. (Robertson, G. P., et al. (2014))

Composición química y física del suelo de las lagunas

El almacenamiento de carbono en los suelos constituye un proceso ecológico esencial para la regulación del clima global y la mitigación del cambio climático. Este proceso ocurre principalmente a través de la acumulación de materia orgánica, resultado de la descomposición de residuos vegetales y animales. Una vez incorporado al suelo, el carbono puede quedar fijado en formas estables como el humus, permaneciendo allí durante décadas o incluso siglos,

dependiendo de las condiciones del entorno.

La capacidad del suelo para almacenar carbono no es uniforme, sino que depende de varios factores físicos, químicos y biológicos. Entre los más determinantes se encuentran el tipo de suelo, su textura (proporción de arcilla, limo y arena), la estructura (agregación de partículas), la presencia y cantidad de materia orgánica, y las condiciones climáticas y de manejo. Los suelos ricos en arcilla, por ejemplo, tienden a proteger mejor la materia orgánica al formar complejos estables, lo que contribuye a una mayor retención de carbono. (Six et al., 2002)

En el caso de los humedales, y en particular de aquellos con suelos permanentemente saturados, como los que se encuentran en turberas y bofedales altoandinos, la acumulación de carbono es especialmente alta. Esto se debe a que la presencia constante de agua limita el acceso de oxígeno, lo que ralentiza significativamente la descomposición microbiana de la materia orgánica. Como resultado, se produce una acumulación progresiva de restos vegetales parcialmente descompuestos, lo que genera capas de turba con una notable capacidad de secuestrar carbono atmosférico.

Sin embargo, esta función ecológica crítica puede verse comprometida por prácticas humanas inadecuadas. Actividades como la agricultura intensiva, el drenaje de humedales, la deforestación y el sobrepastoreo pueden alterar profundamente las propiedades físicas del suelo. Estos cambios no solo deterioran la estructura del suelo, sino que también aumentan su exposición al oxígeno, acelerando la descomposición de la materia orgánica acumulada y liberando grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera. De esta manera, el suelo deja de ser un sumidero de carbono y se convierte en una fuente neta de emisiones.

Asimismo, el clima desempeña un papel determinante en la tasa de descomposición de la materia orgánica y, por ende, en el potencial de almacenamiento de carbono. En climas fríos y húmedos, como los que predominan en los bosques boreales, turberas o zonas altoandinas, la

baja temperatura ralentiza los procesos de mineralización, permitiendo que el carbono se acumule en el suelo durante períodos prolongados. En contraste, en climas cálidos y secos, la actividad microbiana se incrementa, lo que acelera la descomposición y reduce el tiempo de permanencia del carbono en el suelo.

En síntesis, los suelos —y especialmente los de ecosistemas como los humedales— desempeñan un rol fundamental en el balance global de carbono. Su protección y manejo sostenible son esenciales no solo para conservar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos asociados, sino también como estrategia clave en la lucha contra el calentamiento global. La comprensión y valoración de estos procesos permite formular políticas más efectivas para la restauración ecológica, la mitigación climática y la gestión de los recursos naturales en contextos tanto rurales como urbanos. (Fennessy, M. S., et al. (2011).)

Procesos de acumulación y liberación de carbono en humedales y lagunas

Los humedales y lagunas constituyen ecosistemas clave dentro del ciclo global del carbono, actuando como intercambiadores dinámicos de este elemento entre la biosfera, la atmósfera y la litosfera. Su relevancia radica en que son altamente productivos en términos biológicos, capaces de capturar grandes cantidades de carbono atmosférico a través de diversos mecanismos naturales. (Bridgham, et al 2006)

La acumulación de carbono en estos sistemas se produce fundamentalmente por medio de la fotosíntesis realizada por plantas acuáticas y ribereñas, como totoras (*Typha angustifolia*), juncos (*Juncus spp*) y otras especies hidrófitas. Estas plantas capturan dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera y lo transforman en materia orgánica, la cual, al morir, se deposita sobre o dentro del suelo saturado de agua. Lo particular de los humedales es que podría presentar condiciones con poco o nada de oxígeno, los procesos de descomposición microbiana se

ralentizan considerablemente. Esto evita la rápida liberación de carbono y favorece su acumulación a largo plazo en forma de humus, materia orgánica y turba.

Este mecanismo convierte a los humedales, especialmente los de altas latitudes o zonas montañosas como los bofedales altoandinos, en sumideros de carbono muy eficientes, capaces de almacenar este elemento durante siglos o milenios. De hecho, las turberas (suelos con alto contenido de materia orgánica y agua) son reconocidas como uno de los mayores depósitos de carbono terrestre, superando incluso a los bosques tropicales en términos de carbono retenido por unidad de superficie. (Huaman et al., 2020)

Sin embargo, estos ecosistemas no solo acumulan, sino que también liberan carbono, principalmente en forma de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), ambos gases de efecto invernadero. El CO_2 se genera como producto de la respiración de las plantas, microorganismos y animales, mientras que el metano es producido por bacterias metanogénicas en ambientes anóxicos, donde no hay suficiente oxígeno para la descomposición aeróbica. La producción de metano es especialmente alta en zonas pantanosas con alta carga de materia orgánica, como los suelos de turba saturados. (Bridgham, et al 2006)

El equilibrio entre la captura (secuestro) y la emisión de carbono depende de múltiples factores interrelacionados. Entre ellos se encuentran:

- **El tipo y densidad de vegetación:** Plantas con alta biomasa y raíces profundas tienden a aportar más carbono al sistema.
- **El clima:** Climas fríos y húmedos favorecen la acumulación, mientras que temperaturas más altas aceleran la descomposición y liberación de carbono.
- **La hidrología del ecosistema:** La profundidad y permanencia del agua determinan la oxigenación del suelo, influyendo en la velocidad de descomposición.
- **La intervención humana:** Acciones como el drenaje de humedales para uso agrícola, la quema de vegetación, o la construcción de infraestructuras alteran el balance natural,

provocando la oxidación acelerada de la materia orgánica acumulada y la liberación masiva de CO₂ a la atmósfera.

Cuando se mantienen en condiciones naturales, los humedales funcionan como sumideros de carbono, contribuyendo activamente a la mitigación del cambio climático. Pero cuando son degradados, se convierten en emisores netos, liberando el carbono que han almacenado durante siglos en un corto período de tiempo, lo que agrava el calentamiento global.

Por ello, resulta fundamental proteger, restaurar y manejar sosteniblemente estos ecosistemas. Su conservación no solo preserva la biodiversidad y los servicios ecosistémicos asociados, sino que también representa una estrategia eficaz y natural para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y alcanzar metas climáticas globales. (Roa-García, 2016)

3.2.12. Métodos de cuantificación del carbono almacenado

Cuantificar el carbono almacenado en los suelos de humedales y lagunas es clave para entender su contribución al ciclo global del carbono y su potencial para mitigar el cambio climático. Los métodos de estimación varían según factores como la escala, el tipo de ecosistema y la profundidad del suelo, y se clasifican en tres enfoques principales: análisis directo del carbono en el suelo, modelado matemático y uso de herramientas remotas para evaluaciones a gran escala. (Fennessy, 2011, págs. 159-168)

Una de las técnicas más confiables y ampliamente utilizadas para determinar el contenido de carbono orgánico en los humedales es el muestreo directo del suelo, seguido de su análisis en laboratorio. Este enfoque permite obtener datos precisos sobre la cantidad de carbono almacenado en diferentes estratos del suelo, proporcionando una visión clara del rol que desempeñan estos ecosistemas como sumideros de carbono.

El primer paso consiste en identificar y seleccionar puntos de muestreo representativos dentro del ecosistema de humedal. Estos sitios se escogen en función de características como

el tipo de vegetación, la topografía, la accesibilidad y la variabilidad del paisaje. La representatividad del sitio es clave para que los resultados obtenidos puedan extrapolarse al ecosistema en general.

Una vez seleccionados los puntos de muestreo, se procede a extraer núcleos de suelo utilizando herramientas especializadas, como barrenos o cilindros metálicos conocidos como cores. Estas herramientas permiten obtener columnas intactas de suelo, las cuales mantienen la distribución vertical original de los materiales. Las muestras se recolectan por capas de profundidad (por ejemplo: 0–10 cm, 10–30 cm y 30–50 cm), ya que la distribución del carbono varía significativamente con la profundidad.

Las muestras recolectadas se colocan en bolsas o frascos herméticos, rotuladas con precisión, y se almacenan en condiciones adecuadas (a menudo refrigeradas) para evitar la degradación de la materia orgánica antes de ser analizadas en el laboratorio. En el laboratorio, las muestras de suelo pasan por un proceso de secado, tamizado y homogenización. Luego, se determina el contenido de carbono orgánico mediante técnicas como el método Walkley-Black (oxidación húmeda con dicromato de potasio) o, en casos más avanzados, mediante combustión seca en analizadores elementales, que proporcionan mediciones más exactas del carbono total. (Medrano, 2012)

Con los datos obtenidos se calcula la densidad de carbono (expresada en toneladas por hectárea o gramos por centímetro cúbico), considerando la profundidad del muestreo, la densidad aparente del suelo y el contenido porcentual de carbono orgánico. Este cálculo permite estimar la cantidad total de carbono almacenado por unidad de área, lo cual es esencial para comparaciones espaciales y temporales entre diferentes tipos de humedales o estados de conservación. (Schimel, 1994, págs. 661–678.)

Tras la recolección de muestras de suelo en el campo, el siguiente paso esencial en el proceso de estimación del carbono almacenado es el análisis de laboratorio. Este procedimiento

tiene como finalidad determinar de forma precisa la cantidad de carbono orgánico presente en las diferentes capas del suelo recolectado. Para ello, se emplean métodos científicamente validados que permiten estimar el carbono con altos niveles de precisión. Entre los más utilizados se encuentran:

Este método consiste en calentar las muestras de suelo previamente secadas en un horno a una temperatura constante de 550 °C, durante un tiempo determinado (usualmente de 4 a 6 horas). Bajo estas condiciones, la materia orgánica presente se quema o se volatiliza, quedando únicamente la fracción mineral del suelo, la pérdida de peso que se observa después del calentamiento se asocia a la cantidad de materia orgánica que se ha incinerado.

Como gran parte de la materia orgánica está compuesta por carbono, esta pérdida puede ser utilizada como una estimación indirecta del contenido de carbono. Aunque este método no mide directamente el carbono, es ampliamente usado por su bajo costo, facilidad de aplicación y resultados confiables, especialmente en suelos con altos contenidos orgánicos como los de humedales y turberas. El método de oxidación húmeda, descrito por Nelson y Sommers (Nelson, 1996, págs. 961–1010), implica la reacción de la materia orgánica del suelo con una solución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en medio ácido. En esta reacción, el carbono orgánico es oxidado químicamente y la cantidad de dicromato que no reacciona se mide posteriormente mediante una valoración química (titulación). Esto permite determinar cuánto carbono fue oxidado, proporcionando una estimación del contenido de carbono orgánico en la muestra.

Este método sí cuantifica directamente el carbono y es muy utilizado en estudios científicos y técnicos. Presenta una buena relación entre precisión y costo, aunque puede subestimar el carbono total en suelos muy ricos en humus o materia orgánica altamente estabilizada.

Los datos obtenidos a través de cualquiera de estos métodos se transforman en unidades

estándar para facilitar su interpretación a escala de paisaje o ecosistema. Comúnmente, el carbono orgánico se expresa como:

- Toneladas de carbono por hectárea ($t\ C\ ha^{-1}$), que permite estimar cuánto carbono se almacena en una determinada superficie de humedal.
- Este cálculo también requiere datos complementarios como: La densidad aparente del suelo (peso del suelo seco por unidad de volumen), el espesor de la capa de suelo analizada, y el porcentaje de carbono orgánico obtenido del laboratorio.
- Este análisis es crucial para entender el papel que juegan los humedales como sumideros de carbono y permite generar líneas base confiables para planes de conservación, restauración ecológica y estrategias de mitigación del cambio climático. Estos resultados se pueden expresar en toneladas de carbono por hectárea ($t\ C\ ha^{-1}$).

Este método permite obtener una estimación precisa de la cantidad de carbono almacenado en el suelo de los humedales, pero su aplicación es intensiva en tiempo y costos, especialmente a gran escala.

3.2.13. Métodos de modelado

El modelado matemático y la simulación computacional representan herramientas fundamentales para estimar la cantidad de carbono almacenado en ecosistemas complejos como los humedales. Estos métodos integran múltiples variables ambientales y procesos ecológicos para generar estimaciones que serían difíciles o costosas de obtener únicamente a través de mediciones directas.

Los modelos tienen la capacidad de considerar diversos factores que influyen en la dinámica del carbono en humedales, tales como: Las características del suelo (tipo, textura, contenido de materia orgánica), la vegetación predominante (su biomasa, tasa de crecimiento y descomposición), las condiciones climáticas (temperatura, humedad, precipitaciones), y la dinámica del agua (niveles de saturación, flujo y calidad). (Bridgham, et al, 2006)

Modelo DAYCENT

Este modelo simula el ciclo del carbono y del nitrógeno en el suelo a partir de variables ambientales y procesos biogeoquímicos. DAYCENT tiene la capacidad de reproducir cómo la materia orgánica se descompone, cómo se libera o almacena el carbono, y cómo las condiciones del suelo y el clima afectan estas dinámicas a lo largo del tiempo. Es especialmente útil para analizar cambios en el uso del suelo y prácticas de manejo que impactan el almacenamiento de carbono.

Modelo CENTURY

Se enfoca en la simulación a largo plazo de la productividad primaria neta (PPN) y la dinámica del carbono en diferentes compartimentos del ecosistema, incluyendo la biomasa vegetal y el suelo. CENTURY puede evaluar la capacidad del ecosistema para capturar carbono mediante el crecimiento de las plantas y el almacenamiento en el suelo, considerando también la descomposición de materia orgánica.

Modelo BIOME-BGC

Este modelo es utilizado para estimar la productividad y los flujos de carbono, agua y nutrientes en los ecosistemas terrestres. Calcula la captura de carbono a través de la fotosíntesis, la respiración de las plantas y microorganismos, y la transferencia de carbono entre suelo y biomasa, siendo útil para predecir cómo diferentes condiciones ambientales afectan la capacidad de almacenamiento de carbono.

El uso de estos modelos ofrece la ventaja de poder generar estimaciones rápidas, eficientes y a gran escala, lo que facilita la toma de decisiones en gestión ambiental y política climática. Permiten simular escenarios futuros y evaluar el impacto de diferentes prácticas de uso del suelo o cambios climáticos en el balance de carbono.

Sin embargo, es importante destacar que estos modelos pueden presentar ciertas incertidumbres y limitaciones. La dinámica del carbono en humedales está influenciada por

procesos complejos y variables que cambian tanto en el espacio como en el tiempo, como la heterogeneidad del suelo, variabilidad climática, y la interacción entre distintos organismos. Estas variaciones pueden dificultar la precisión absoluta de las estimaciones generadas por los modelos.

Por ello, es común que las simulaciones se complementen con datos de campo y análisis de laboratorio para validar y ajustar los resultados, asegurando así una mejor representación del funcionamiento real del ecosistema. Los métodos de modelado son herramientas poderosas que, al combinar conocimiento científico y datos ambientales, permiten estimar y entender el almacenamiento y flujo de carbono en humedales con mayor alcance y eficiencia, aunque siempre bajo la consideración de sus limitaciones inherentes. (Verhoeven et al., 2006)

Métodos remotos: Teledetección

La teledetección se ha consolidado como una herramienta tecnológica fundamental para monitorear, analizar y estimar el carbono almacenado en ecosistemas como los humedales y lagunas, especialmente cuando se requiere trabajar a escalas regionales, nacionales o incluso globales. Esta técnica se basa en el uso de imágenes captadas desde satélites o sensores aéreos que registran información sobre la superficie terrestre sin necesidad de contacto directo. (Ramsar, 2014)

Mediante esta técnica se puede obtener información clave sobre la cobertura vegetal (tipo, densidad y extensión), las características del suelo, la presencia y dinámica del agua (nivel de saturación, permanencia estacional), y la biomasa aérea, que es un indicador clave del carbono capturado por la vegetación.

Esta información se obtiene gracias a sensores que miden la reflexión de la luz en distintas longitudes de onda, lo que permite inferir el estado y vigor de la vegetación, la humedad del suelo, e incluso la estructura del paisaje. NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada): Este índice es ampliamente utilizado para estimar la biomasa vegetal

y, por extensión, la cantidad de carbono almacenado en las plantas. Se calcula a partir de la diferencia entre la radiación reflejada en el infrarrojo cercano (NIR) y el rojo (RED). Valores más altos de NDVI indican mayor cobertura vegetal activa y, por tanto, mayor capacidad de secuestro de carbono. Es especialmente útil en humedales donde las variaciones estacionales de vegetación son significativas. LIDAR (Light Detection and Ranging): El LIDAR es una tecnología activa que emite pulsos láser y mide el tiempo que tardan en reflejarse en la superficie. Esto permite construir modelos 3D de alta resolución del paisaje, capturando con precisión la altura, volumen y estructura del dosel vegetal, lo cual es esencial para estimar la biomasa arbórea y herbácea. En humedales, el LIDAR es particularmente valioso porque puede penetrar parcialmente a través del dosel denso, revelando detalles estructurales que otros sensores no captan. Sensores hiperespectrales y multiespectrales: Estos sensores capturan información en múltiples bandas del espectro electromagnético, permitiendo una clasificación más detallada del tipo de vegetación, su estado fisiológico, y la humedad del suelo. Esta información se puede integrar en modelos para estimar la productividad del ecosistema y la acumulación de carbono en distintos compartimentos (biomasa, hojarasca, suelo). (Pettorelli et al., 2005)

- Ventajas: Cobertura amplia y continua en el tiempo, ideal para zonas de difícil acceso, monitoreo temporal, lo que permite seguir la evolución de los ecosistemas húmedos a lo largo de estaciones o años, detección de cambios, útil para identificar degradación, inundaciones o alteraciones en el uso del suelo que afecten el balance de carbono.
- Limitaciones: la resolución espacial de los sensores puede no ser suficiente para captar con precisión detalles en humedales muy pequeños o fragmentados. las condiciones atmosféricas (como nubosidad persistente en regiones tropicales) pueden interferir con la calidad de las imágenes, requiere calibración con datos de campo (por ejemplo, muestras de suelo o biomasa), ya que las estimaciones puramente remotas pueden

contener errores si no se ajustan a la realidad local.

La teledetección es una herramienta poderosa para estimar y monitorear el carbono almacenado en humedales y lagunas, combinando rapidez y eficiencia a gran escala. Su integración con datos de campo y modelos ecológicos permite una evaluación más precisa del papel de estos ecosistemas como sumideros de carbono, especialmente relevante en el contexto del cambio climático y la gestión ambiental. (Tarnocai, 2009)

3.2.14. Métodos de estimación de carbono en biomasa aérea y subterránea

La estimación del carbono almacenado en la biomasa vegetal, tanto aérea (hojas, tallos, ramas) como subterránea (raíces), es una parte clave del estudio del ciclo del carbono en ecosistemas naturales como los humedales y lagunas. Estos ecosistemas, al albergar una gran cantidad de materia vegetal viva y muerta, actúan como sumideros de carbono que pueden influir significativamente en el balance global de gases de efecto invernadero.

Para cuantificar con precisión cuánto carbono retiene la vegetación, se emplean diversas metodologías científicas, que incluyen mediciones directas, modelos empíricos o alométricos, y herramientas avanzadas como la teledetección. A continuación, se describen estas técnicas con mayor profundidad:

Este método se basa en la recolección física de la biomasa vegetal. Consiste en: Cortar y pesar toda la biomasa aérea de plantas representativas en parcelas seleccionadas (como totoras, juncos o espadañas), para la biomasa subterránea, se excava hasta ciertas profundidades para extraer las raíces, que luego se limpian y secan.

Después, el material vegetal recolectado se seca en horno (generalmente a 70 °C) hasta obtener peso seco constante. Este dato se transforma en contenido de carbono utilizando un factor de conversión común (aproximadamente el 50% del peso seco corresponde a carbono).

- Ventajas: Alta precisión local, ideal para validar otros métodos.
- Limitaciones: Es laborioso, destructivo y limitado a áreas pequeñas.

Son fórmulas matemáticas que permiten estimar la biomasa de una planta o comunidad vegetal sin necesidad de cosecharla. Se basan en variables fácilmente medibles en campo, como:

- Altura de la planta
- Diámetro del tallo
- Densidad de la vegetación

Estos modelos se desarrollan a partir de estudios previos en los que se ha correlacionado la biomasa real (medida) con las características físicas de las plantas. Una vez estimada la biomasa total, se aplica un factor de conversión de carbono (usualmente entre 0.45 y 0.50) para obtener el carbono almacenado. (Chave et al., 2005)

- Ventaja: Método no destructivo, útil para áreas grandes y monitoreo continuo.
- Limitaciones: Depende de la disponibilidad de modelos específicos para cada tipo de vegetación y ecosistema.

La teledetección, mediante el uso de sensores remotos (satélites o drones), permite cuantificar biomasa y carbono de manera eficiente en grandes áreas. Herramientas como:

- NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) se usa para estimar la densidad y vigor de la vegetación.
- LIDAR, que genera modelos tridimensionales de la vegetación, permite estimar la estructura y volumen de la biomasa aérea, especialmente en zonas de vegetación densa como juncuales o totorales.

Los datos obtenidos se incorporan en modelos que convierten la biomasa estimada en carbono, lo cual permite hacer proyecciones temporales y espaciales de los niveles de captura de carbono vegetal.

- Ventajas: Cobertura amplia y continua, ideal para monitoreo regional o nacional.
- Limitaciones: Puede requerir calibración con datos de campo, su precisión varía según la calidad y resolución de las imágenes.

En muchos ecosistemas, especialmente en humedales, la biomasa subterránea puede ser igual o incluso superior a la biomasa aérea. Esto es particularmente relevante en plantas como juncos o ciperáceas, que desarrollan extensas raíces y rizomas para adaptarse a suelos anegados. Por tanto, una evaluación completa del carbono vegetal debe considerar ambas fracciones, ya que juntas constituyen una parte importante del almacenamiento total de carbono del ecosistema.

Los métodos de estimación del carbono en la biomasa aérea y subterránea son esenciales para entender la función ecológica de los humedales y lagunas en el ciclo global del carbono. La combinación de técnicas directas, modelos alométricos y teledetección permite obtener datos más precisos, escalables y útiles para políticas de conservación, restauración y mitigación del cambio climático.

3.2.15. Estimación de biomasa muerta

La biomasa aérea comprende toda la porción de la vegetación que se encuentra por encima del nivel del suelo, incluyendo estructuras como tallos, hojas, ramas y, en el caso de especies leñosas, los troncos. Esta fracción vegetal es clave en el estudio de los ecosistemas, ya que representa una parte significativa del carbono que capturan y almacenan los organismos fotosintéticos. Para estimar la biomasa aérea y su correspondiente contenido de carbono, se aplican distintos métodos agrupados en tres categorías principales:

a) Métodos destructivos

Este enfoque consiste en la recolección física directa de la vegetación. Se seleccionan muestras representativas de plantas, que luego son cortadas, secadas y pesadas. El peso seco obtenido permite calcular la biomasa total, y a partir de ella, se estima el carbono almacenado utilizando un factor de conversión, generalmente aceptado como el 50% del peso seco (Brown, 2002), aunque este valor puede variar ligeramente según la especie o el tipo de ecosistema. Si bien este procedimiento es considerado altamente preciso, presenta importantes limitaciones,

no es aplicable en áreas extensas debido a su naturaleza intensiva y destructiva, puede afectar negativamente la estructura y equilibrio del ecosistema al retirar organismos vegetales, requiere un manejo cuidadoso y permisos, especialmente en zonas protegidas o sensibles. (Brown, S, 2002)

Por estas razones, este método se utiliza sobre todo en estudios experimentales o en la calibración de modelos indirectos más amplios. (Brown, 2002). Aunque este método es muy preciso, no es práctico para grandes áreas debido al esfuerzo requerido y la necesidad de destruir las plantas en el proceso.

b) Métodos no destructivos

Este enfoque evita la recolección de vegetación, utilizando en su lugar mediciones morfométricas de las plantas directamente en el campo. Los parámetros más comunes que se registran son: altura de las plantas, diámetro del tallo o tronco (a veces a la altura del pecho, conocido como DAP), cobertura o densidad de la vegetación área basal en comunidades vegetales densas. (Chave, J., et al., 2005).

Con estos datos se aplican ecuaciones alométricas, que son fórmulas matemáticas desarrolladas a partir de relaciones empíricas entre las dimensiones observables de las plantas y su biomasa. Estas ecuaciones han sido adaptadas a diferentes tipos de vegetación y regiones, por lo que su aplicación depende del ecosistema específico. En el caso de humedales altoandinos o zonas lacustres, se utilizan modelos ajustados para especies como la totora (*Typha angustifolia*) o los juncos (*Juncus spp.*).

- Ventajas: No altera el ecosistema. Más eficiente en tiempo y costo en comparación con métodos destructivos. Facilita el monitoreo continuo a lo largo del tiempo.
- Limitaciones: Menor precisión si no se dispone de ecuaciones específicas para las especies o áreas estudiadas. Puede requerir calibración con datos obtenidos por métodos destructivos.

c) Teledetección

La teledetección ha revolucionado la estimación de biomasa aérea en áreas amplias, permitiendo realizar estudios de carbono a escala regional o global. Este enfoque utiliza información capturada por sensores montados en satélites o drones, que pueden interpretar la estructura y composición de la vegetación mediante distintos tipos de imágenes y señales.

Entre las técnicas más utilizadas destacan:

- NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada): mide la intensidad de la vegetación verde activa, proporcionando una estimación indirecta de la biomasa viva.
- LIDAR (Light Detection and Ranging): emite pulsos láser para medir la altura y distribución vertical de la vegetación, generando modelos tridimensionales del dosel vegetal.
- RADAR: útil para penetrar nubes y captar características estructurales de la vegetación en condiciones climáticas adversas.

Estos datos pueden combinarse con modelos alométricos para estimar el contenido de carbono almacenado en la vegetación aérea de forma más detallada y a gran escala.

- Ventajas: Cobertura extensa y repetida en el tiempo, no invasivo y adaptable a diversas condiciones ambientales, permite monitoreo continuo de cambios en la vegetación y en los patrones de carbono.
- Desventajas: Puede requerir validación con datos de campo, la precisión depende de la resolución espacial y espectral de los sensores.

La estimación de la biomasa aérea y su contenido de carbono es un componente esencial para evaluar el rol de los ecosistemas en la mitigación del cambio climático. La elección del método adecuado depende del tamaño del área de estudio, los recursos disponibles, y el nivel de precisión requerido. La combinación de técnicas destructivas, no destructivas y de teledetección permite generar datos más robustos y confiables para una gestión sostenible de

los humedales, lagunas y otros ecosistemas sensibles.

Estimación de biomasa subterránea

La biomasa subterránea, que incluye las raíces de las plantas, es un componente crucial en el almacenamiento de carbono, especialmente en los humedales. La estimación de la biomasa subterránea se realiza a través de métodos directos e indirectos:

a) Muestreo destructivo de raíces

En este enfoque, se excavan muestras de suelo a diferentes profundidades para recolectar las raíces de las plantas. Estas raíces se pesan y se utilizan para calcular la biomasa subterránea. Al igual que con la biomasa aérea, la biomasa subterránea se convierte en carbono utilizando una proporción empírica basada en estudios previos (Taylor et al., 2008). Sin embargo, este método es invasivo y solo es aplicable en áreas pequeñas o experimentales.

b) Modelos alométricos para biomasa subterránea

El uso de modelos alométricos es común para estimar la biomasa subterránea. Estos modelos emplean ecuaciones que relacionan parámetros como el diámetro del tronco o la biomasa aérea con la biomasa de las raíces.

c) Estimación indirecta utilizando la biomasa aérea

Una aproximación común para estimar la biomasa subterránea es asumir una relación constante entre esta y la biomasa aérea, considerando que las raíces representan entre el 20 % y el 40 % de la biomasa total. Esta proporción facilita cálculos en ecosistemas donde medir directamente las raíces es complicado.

Para calcular el carbono almacenado, se estima que este representa aproximadamente el 50 % de la biomasa seca, lo que permite determinar el carbono total mediante la fórmula: $C = \text{Biomasa} \times 0.5$. Este valor puede variar según el tipo de vegetación y las condiciones del suelo, pero es ampliamente aceptado como referencia. (López, C. A., et al., 2017)

Técnicas de muestreo de vegetación

El muestreo de vegetación es un proceso fundamental para la investigación ecológica, pues permite la obtención de datos representativos sobre la estructura, composición y distribución de las plantas en un área determinada. A través del muestreo, se puede cuantificar la biodiversidad, estimar la biomasa, analizar la dinámica de la vegetación y evaluar el impacto de factores bióticos y abióticos en los ecosistemas. Existen diversas técnicas de muestreo que se eligen en función de los objetivos de investigación, la escala espacial, el tipo de vegetación y las características del ecosistema.

3.2.16. Técnicas de muestreo descriptivo

El muestreo descriptivo tiene como objetivo proporcionar una imagen general de la vegetación de un área. En este tipo de muestreo se seleccionan parcelas o unidades de muestreo para recolectar datos sobre la estructura y composición de las especies vegetales presentes en la zona.

a. Muestreo por parcelas cuadradas o rectangulares

Una de las técnicas más comunes es el muestreo por parcelas de área fija. Estas parcelas pueden ser cuadradas, rectangulares o de cualquier otra forma regular y se utilizan para contar las especies, medir la densidad y la cobertura de las plantas. La elección del tamaño de la parcela depende de la heterogeneidad del paisaje y de las especies que se estén investigando. Esta técnica es muy efectiva en bosques, praderas y ecosistemas con vegetación densa.

b. Muestreo en transectos

El muestreo en transectos es otra técnica comúnmente utilizada para evaluar la distribución de las especies a lo largo de una línea determinada. Esta técnica es útil cuando se estudian gradientes ambientales, como variaciones en la altitud, la humedad o la exposición al sol. Los transectos pueden ser de longitud fija o variable, y se suelen utilizar para estimar la abundancia relativa de las especies y las zonas de mayor diversidad.

3.2.9. Técnicas de muestreo cuantitativo

Estas técnicas permiten obtener datos precisos sobre la cantidad y la biomasa de la vegetación. Son esenciales para estudios en los que se necesita determinar la cantidad de materia orgánica, la biomasa aérea y subterránea o el carbono almacenado en el ecosistema.

a. Muestreo de cobertura vegetal

Este tipo de muestreo mide la proporción del suelo cubierta por la vegetación. Se puede realizar mediante la técnica de puntos de intersección, donde se utilizan estacas o cintas para contar la cantidad de intersecciones con las plantas. Una forma alternativa es el método de cuadrículas de contorno, donde se evalúa el área cubierta por las especies en una cuadrícula sobre el terreno. Este tipo de muestreo es útil para medir la densidad de la vegetación y el porcentaje de cobertura, especialmente en suelos desnudos o praderas.

b. Muestreo de biomasa

El muestreo de biomasa se utiliza para estimar la cantidad de materia orgánica en los ecosistemas. Se puede realizar de manera destructiva o no destructiva. En el muestreo destructivo, se seleccionan individuos de diferentes especies y tamaños para extraer las plantas, medir su biomasa aérea y subterránea, y luego estimar la biomasa total del ecosistema mediante relaciones alométricas o ecuaciones específicas para cada especie (Brown, 2002). En el muestreo no destructivo, las técnicas alométricas, como las ecuaciones de biomasa en función del diámetro y la altura, son más comunes (Chave, 2005)

Métodos para determinar el carbono orgánico en suelos

Existen varios métodos para determinar el contenido de carbono orgánico en el suelo, siendo los más utilizados el método de oxidación húmeda de Walkley-Black, la combustión en un horno y la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR). (Walkley, A., & Black, I. A., 1934).

Método de oxidación húmeda de Walkley-Black

El método de Walkley-Black es uno de los métodos clásicos para determinar el carbono

orgánico en suelos. Este procedimiento se basa en la oxidación del carbono orgánico con una solución de dicromato de potasio en medio ácido, y la cantidad de dicromato reducido se mide colorimétricamente. Este método es ampliamente utilizado debido a su simplicidad y bajo costo, aunque tiene limitaciones en su capacidad para medir el carbono recalcitrante (Walkley & Black, 1934).

Método de combustión en horno

La combustión en horno es otro método común para determinar el carbono orgánico en los suelos. En este método, se toma una muestra del suelo, que se seca y se somete a altas temperaturas (alrededor de 550°C) en un horno, lo que convierte el carbono orgánico en dióxido de carbono (CO_2), el cual se mide posteriormente mediante un detector de CO_2 . Este método es muy preciso, pero también costoso y requiere equipo especializado (Nelson, Total carbon, organic carbon, and organic matter. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*, 1996)

Espectroscopía de Infrarrojo Cercano (NIR)

La espectroscopía NIR es un método más reciente que permite medir el contenido de carbono orgánico en el suelo de manera rápida y no destructiva. Este método se basa en la absorción de luz infrarroja cercana por parte de los grupos funcionales presentes en la materia orgánica del suelo. La espectroscopía NIR es especialmente útil para la medición de grandes cantidades de muestras, pero requiere una calibración precisa (Kemper, 1965)

Métodos de laboratorio (Walkley-Black)

Se basa en la oxidación del carbono orgánico mediante una mezcla de dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) y ácido sulfúrico (H_2SO_4), que produce CO_2 y otros compuestos. La cantidad de dicromato reducido se mide para estimar el contenido de carbono orgánico. Siendo así, este método mide específicamente el carbono oxidable presente o carbono orgánico como se menciona, mientras que el resto de elementos como hidrógeno, oxígeno y nitrógeno son

discriminados por su consumo despreciable del oxidante. Sin embargo, este método solo oxida aproximadamente el 75% del carbono orgánico total, por lo que requiere calibración para ajustar los resultados y proporcionar una estimación precisa. (Walkley, A., & Black, I. A., 1934).

Proceso del método de Walkley-Black

El proceso básico del método de Walkley-Black es el siguiente:

- **Preparación de la muestra:** Se toma una muestra representativa de suelo o biomasa que ha sido previamente secada y molida. La muestra debe pesar aproximadamente 1 g para obtener una medición precisa.
- **Adición de reactivos:** A la muestra se le añade un volumen específico de dicromato de potasio disuelto en agua, seguido por la adición de ácido sulfúrico concentrado. La mezcla se deja reposar durante un tiempo determinado para permitir la reacción de oxidación.
- **Reacción de oxidación:** El dicromato de potasio oxida el carbono orgánico de la muestra en presencia del ácido, lo que produce iones de cromo (Cr^{3+}), mientras que el carbono se convierte en dióxido de carbono (CO_2) y otros subproductos.
- **Medición de la reducción del dicromato:** Una vez completada la reacción, la reducción del dicromato se mide utilizando una técnica colorimétrica. Se puede realizar una titulación con sulfato ferroso (FeSO_4) para determinar la cantidad de dicromato que no ha reaccionado.
- **Cálculo del carbono orgánico:** Finalmente, con base en la cantidad de dicromato reducido, se calcula el contenido de carbono orgánico en la muestra de suelo utilizando una ecuación de conversión que toma en cuenta la cantidad de material orgánico que fue oxidado durante el proceso, de esta forma los resultados se expresan como porcentaje de carbono orgánico (% C).

Ventajas:

- Relativamente simple y económico: El método de Walkley-Black es fácil de ejecutar y no requiere equipos sofisticados, lo que lo hace accesible para muchos laboratorios.
- Ampliamente utilizado: Es uno de los métodos más aceptados y utilizados a nivel mundial para la determinación del carbono orgánico en suelos, con resultados bastante confiables para muchos tipos de suelos.
- Calibración: El método tiene una calibración robusta que ha sido utilizada ampliamente en distintas condiciones, lo que ayuda a garantizar su validez en diversos estudios y condiciones geográficas.

Limitaciones:

- Subestima el carbono orgánico: El método de Walkley-Black no oxida completamente todo el carbono presente en el suelo, ya que hay fracciones de carbono que no son fácilmente oxidadas con el dicromato de potasio. En su mayoría, el método se utiliza para carbono fácil o intermedio, no para el carbono recalcitrante, lo que puede resultar en una subestimación del contenido total de carbono (Nelson, Soil Science Society of America., 1996)
- Requiere un procedimiento cuidadoso: Debido a la naturaleza de los reactivos utilizados (ácido sulfúrico y dicromato), el procedimiento debe ser manejado con precaución para evitar errores o accidentes en el laboratorio.
- Problemas con suelos calcáreos: El método puede ser menos preciso en suelos con una alta concentración de carbonatos, ya que estos pueden interferir en el proceso de oxidación y producir resultados erróneos.

Tabla 2*Comparación de los métodos de estimación de carbono en el suelo*

Método	Ventajas	Limitaciones
Walkley-Black	Rápido, económico, ampliamente aceptado	Subestima el carbono, no adecuado para suelos calcáreos
Combustión (Incineración)	Preciso, mide todo el carbono orgánico	Requiere equipo especializado, es costoso y lento
Digestión Húmeda con Ácido	Determinación precisa de carbono total	Método laborioso, requiere equipos y reactivos peligrosos
Espectroscopía NIR	Rápido, no destructivo, sin reactivos químicos	Requiere calibración precisa, interferencias minerales

En esta investigación se eligió el método Walkley-Black para la determinación del carbono orgánico en suelos debido a su eficiencia, confiabilidad y amplio uso en estudios edafológicos. Este procedimiento permite obtener estimaciones precisas del carbono orgánico oxidable mediante una oxidación química controlada, lo que lo hace adecuado para estudios en ecosistemas naturales como los humedales. La ejecución de los análisis se realizó en un laboratorio certificado, cumpliendo con los estándares nacionales de calidad y control. Además, todos los instrumentos empleados fueron previamente calibrados de acuerdo con las especificaciones técnicas del fabricante y bajo supervisión técnica, lo que garantiza la validez y reproducibilidad de los resultados. Estos cuidados metodológicos aseguran un alto grado de fidelidad en los datos obtenidos, fortaleciendo la solidez de las conclusiones respecto al papel de la laguna de Urcos como sumidero de carbono.

Cada uno de los métodos para la cuantificación de carbono tiene sus propias ventajas y limitaciones, por lo que la elección del método dependerá de factores como el tipo de suelo, la precisión requerida, el equipo disponible y el objetivo del estudio. Mientras que el método de Walkley-Black sigue siendo una opción accesible y práctica para muchos, métodos como la combustión o la espectroscopía NIR ofrecen un análisis más completo y preciso del contenido de carbono total en el suelo.

Modelos de captura de carbono en humedales

Los modelos de captura de carbono en humedales son herramientas fundamentales para entender cómo estos ecosistemas almacenan carbono y contribuyen a la mitigación del cambio climático. Los humedales, caracterizados por su alta productividad biológica y condiciones de saturación de agua, actúan como importantes sumideros de carbono. La acumulación de materia orgánica en sus suelos se debe principalmente a la lenta descomposición que ocurre en ambientes anóxicos (sin oxígeno), lo que permite retener grandes cantidades de carbono durante largos períodos. Este proceso convierte a los humedales en reservorios clave de carbono orgánico, proveniente de biomasa vegetal y restos orgánicos.

El proceso de captura de carbono en los humedales incluye la fotosíntesis, que transforma el dióxido de carbono atmosférico en biomasa vegetal, y la acumulación de esta biomasa en el suelo. Sin embargo, la dinámica de inundación y desecación influye significativamente en el balance de carbono. Mientras que la inundación constante favorece la retención de carbono, la desecación puede liberar CO₂ y metano (CH₄), aumentando las emisiones de gases de efecto invernadero. Factores como el nivel del agua, la temperatura, la vegetación y el tipo de suelo determinan la eficiencia de estos procesos. (Ramsar , 2015)

Las actividades humanas representan una amenaza significativa para la capacidad de los humedales de almacenar carbono. La desecación, la conversión a tierras agrícolas o urbanas, y la contaminación pueden liberar grandes cantidades de carbono previamente almacenado en el suelo, incrementando las emisiones de gases de efecto invernadero. La conservación de estos ecosistemas es esencial no solo para mantener su función como sumideros de carbono, sino también para preservar la biodiversidad. A pesar de cubrir solo el 6% de la superficie terrestre, los humedales almacenan aproximadamente el 30% del carbono global en sus suelos.

3.3. Definición de términos

- **Absorción:** Proceso físico-químico mediante el cual una sustancia (solute o contaminante) penetra y se incorpora al interior del volumen de un material absorbente, como ocurre cuando las raíces y tejidos de *Typha angustifolia* captan nutrientes o metales pesados disueltos en el agua (Kadlec & Wallace, 2009).
- **Adsorción:** Mecanismo superficial por el cual moléculas o iones se adhieren físicamente o mediante enlaces químicos a la superficie externa de un sustrato sólido, como la fijación de fósforo y metales pesados en las paredes celulares y rizomas del totoral (Vymazal, 2011).
- **Sorción:** Término general que engloba tanto la absorción como la adsorción, describiendo la retención total de contaminantes por parte de un material sin distinguir si el proceso ocurre en el volumen interno o en la superficie; es ampliamente usado para explicar la remoción de contaminantes en humedales construidos con *Typha* spp. (Kadlec & Wallace, 2009).
- **Biomasa:** Cantidad total de materia orgánica (vegetal o animal) presente en un ecosistema, expresada comúnmente en toneladas por hectárea (Tn/ha). Incluye biomasa aérea (hojas, tallos) y subterránea (raíces) (Odum & Barrett, 2005).
- **Carbono orgánico del suelo (COS):** Forma de carbono presente en el suelo derivada de residuos vegetales, animales y microorganismos en descomposición. Es clave para la fertilidad del suelo y la captura de carbono (Lal, 2004).
- **Captura de carbono:** Proceso mediante el cual los ecosistemas naturales, como los humedales, absorben dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera y lo almacenan en forma de biomasa y carbono orgánico en el suelo (Mitsch & Gosselink, 2015).
- **Cobertura vegetal:** Proporción del suelo que está cubierta por vegetación. Se mide en porcentaje y es un indicador importante de la densidad y salud del ecosistema (Cronk

& Fennessy, 2001).

- **Densidad aparente del suelo:** Es la relación entre la masa de partículas sólidas secas a 105 °C y el volumen total del suelo in situ, incluyendo el espacio poroso» (Soil Science Society of America, 2021)
- **Densidad superficial:** Cantidad de biomasa o material (kg/m²) por unidad de área en un ecosistema, comúnmente usada para evaluar la productividad vegetal o la acumulación de materia orgánica en humedales. En el caso de totorales, mide la biomasa de *Typha angustifolia* por metro cuadrado (Mitsch & Gosselink, 2007).
- **Ecuaciones alométricas:** Fórmulas matemáticas que relacionan variables fácilmente medibles (como altura o diámetro de la planta) con variables difíciles de medir directamente, como la biomasa o el carbono almacenado (Chave et al., 2014).
- **Ecosistema de humedal:** Sistema ecológico caracterizado por la presencia permanente o temporal de agua. En este contexto, los humedales como la laguna de Urcos actúan como sumideros naturales de carbono (Mitsch & Gosselink, 2015).
- **Materia orgánica:** Conjunto de residuos orgánicos en descomposición, como hojas, raíces y restos animales, que se incorporan al suelo y son fuente de carbono (Mitsch & Gosselink, 2015).
- **Método de Walkley-Black:** Técnica de laboratorio para estimar el contenido de carbono orgánico en suelos mediante oxidación química con dicromato de potasio y ácido sulfúrico (Walkley & Black, 1934).
- **Muestreo cuantitativo:** Técnica de recolección de datos que busca obtener información precisa y medible sobre variables numéricas como biomasa, densidad o cobertura vegetal (Krebs, 2014).

- **Muestreo descriptivo:** Técnica que permite observar y caracterizar cualitativamente la vegetación o el ecosistema sin alterarlo, enfocándose en su estructura y composición (Krebs, 2014).
- **Muestreo en parcelas:** Técnica donde se seleccionan áreas fijas y regulares (cuadradas o rectangulares) para medir y analizar variables del ecosistema como biomasa o densidad de plantas (Krebs, 2014).
- **Muestreo en transectos:** Método de muestreo que consiste en trazar una línea recta a través del área de estudio y registrar la vegetación o características del suelo a lo largo de esa línea (Krebs, 2014).
- **Oxidación húmeda:** Proceso químico mediante el cual se oxida el carbono orgánico en presencia de un agente oxidante (como dicromato) en un medio ácido (Walkley & Black, 1934).
- **Prospección (enfoque prospectivo):** Orientación de la investigación que proyecta sus hallazgos hacia el futuro, anticipando posibles escenarios o consecuencias (Hernández-Sampieri et al., 2018).
- **Propiedades edáficas:** Se refiere a características físicas, químicas y biológicas del suelo que afectan su capacidad de sostén de las plantas (Brady & Weil, 2017)..
- **Sumidero de carbono:** Cualquier ecosistema o sistema natural que absorbe más carbono del que emite, contribuyendo así a mitigar el cambio climático (Lal, 2004).
- **Vegetación emergente:** Plantas acuáticas como el *Typha angustifolia* que crecen en zonas inundadas, pero sobresalen por encima del nivel del agua (Cronk & Fennessy, 2001).
- **Vegetación hidrófila:** Comunidades vegetales que viven arraigadas en lugares pantanosos con agua dulce o salobre y poco profundos (manglar, popal, tular y carrizal) (Cronk & Fennessy, 2001).

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de investigación

El trabajo de investigación que presentamos es de carácter aplicado, ya que sus hallazgos están enfocados en resolver problemas relacionados con el almacenamiento de carbono en el suelo y en el totoral de la laguna de Urcos, ubicada en el distrito de Quispicanchis, en Cusco. Los resultados que obtuvimos buscan ayudar a proteger el ambiente y fomentar estrategias sostenibles para el cuidado y manejo de los recursos naturales en esta zona. Como dice Hernández Sampieri (2014), "la investigación aplicada se caracteriza por su interés en resolver problemas concretos, usando conocimientos ya existentes para mejorar la realidad", esto encaja muy bien con la finalidad principal de este estudio. (Hernández Sampieri et al., 2014)

La metodología que usamos es principalmente cuantitativa, basada en instrumentos que nos permitieron medir directamente las concentraciones de carbono en el suelo y en la vegetación. Como explican Hernández Sampieri, "la investigación cuantitativa involucra la recopilación y análisis de datos para responder a preguntas de investigación y comprobar hipótesis previamente establecidas"(Hernández Sampieri et al., 2014). Esto nos permite obtener resultados objetivos que se puedan aplicar en diferentes contextos.

El enfoque de esta investigación es prospectivo, porque no solo evaluamos el potencial actual de almacenamiento de carbono, sino que también consideramos lo que podría pasar en el futuro, especialmente frente al cambio climático a nivel global. Sobre esto, Tamayo (2004) señalan que "*los estudios prospectivos buscan predecir situaciones futuras basándose en datos*

presentes, ayudando a anticipar consecuencias o tendencias"(Tamayo M, 2004). Esto es muy importante en investigaciones relacionadas con el medio ambiente.

4.1.1 Diseño de investigación

Este estudio se diseñó como una investigación no experimental, porque las variables no fueron modificadas. Según Hernández Sampieri en este tipo de investigación no se manipulan las variables independientes; las situaciones ya ocurrieron o se presentan de forma natural, y el investigador simplemente las observa tal como son en su contexto. Esto encaja bien con el enfoque que usado.

El estudio es transversal según Hernández Sampieri porque los datos se recopilaron en un solo momento. Los estudios transversales se realizan en un solo punto en el tiempo y sirven para describir variables y entender cómo se relacionan en ese momento específico. El diseño es de carácter descriptivo, ya que el objetivo principal fue recopilar información sobre las características del carbono que se almacena en el suelo y en el totoral de la laguna de Urcos, ubicada en el distrito de Quispicanchis, en Cusco. Hernández Sampieri explican que los estudios descriptivos buscan detallar propiedades, rasgos o características importantes de cualquier fenómeno que se analice. El estudio analiza en detalle las propiedades físicas y químicas del ecosistema, para entender mejor cómo está en el presente el almacenamiento de carbono.

4.2. Ámbito temporal y espacial

4.2.1. Espacial

Laguna de Urcos:

- **Distrito:** Urcos
- **Provincia:** Quispicanchi

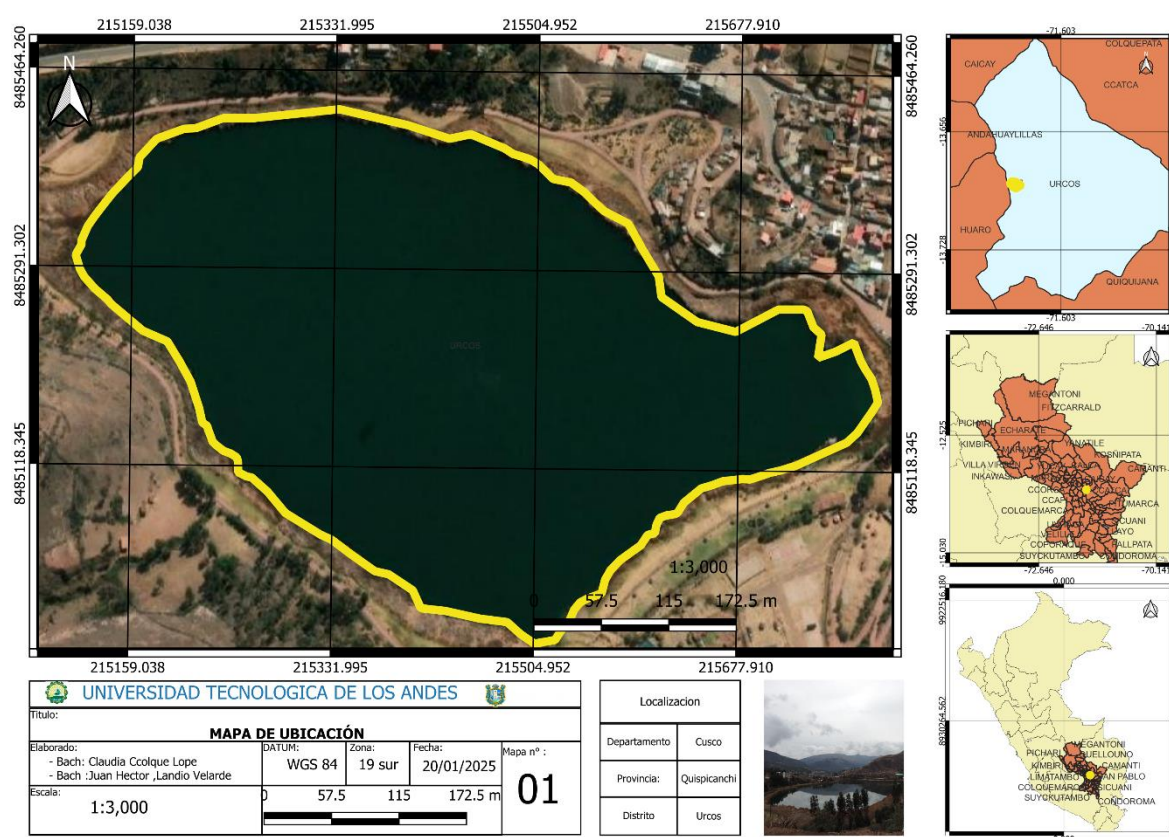
- **Departamento:** Cusco

Coordenadas UTM:

- Norte = 8475000
- Este = 265000
- Altitud = 3400 m.s.n.m

Figura. 5

Plano de ubicación de la laguna de Urcos



La Laguna de Urcos se encuentra en un entorno montañoso andino, rodeada de cerros, pastizales y bofedales (humedales altoandinos) donde predomina el totoral. Forma parte de una cuenca hidrográfica clave que sustenta los ecosistemas locales y es vital para las comunidades campesinas quechua-hablantes asentadas en sus alrededores.

El clima de la zona es frío y semiárido, con temperaturas promedio entre 5°C y 15°C y precipitaciones concentradas de noviembre a marzo. Los suelos poco profundos, ricos en

materia orgánica acumulada en los bofedales, poseen una alta capacidad de retención de agua, lo que refuerza la importancia de este ecosistema para la regulación hídrica y el almacenamiento de carbono (weatherspark.com 2025).

4.2.2. Temporal

El estudio recogió las muestras los meses de junio a agosto del año 2024 siendo una única recolección de muestra por ser la investigación de tipo transversal.

4.3. Población y muestra

La población del estudio comprende toda el área periférica de la laguna de Urcos (Quispicanchis) donde se presenta cobertura continua de vegetación hidrofílica, principalmente *Typha angustifolia* (totoras), se empleó un muestreo no probabilístico de tipo intencional, comúnmente utilizado en investigaciones ecológicas de campo cuando se requiere acceso específico a áreas representativas y con condiciones óptimas para el muestreo (MINAM, 2015).

Como muestra, se seleccionaron cuatro localizaciones (A, B, C y D) a lo largo de la orilla de la laguna, considerando variabilidad en exposición solar, proximidad a actividades antrópicas y densidad de cobertura de totora. En cada localización se extrajeron ocho componentes de datos junto a su replica:

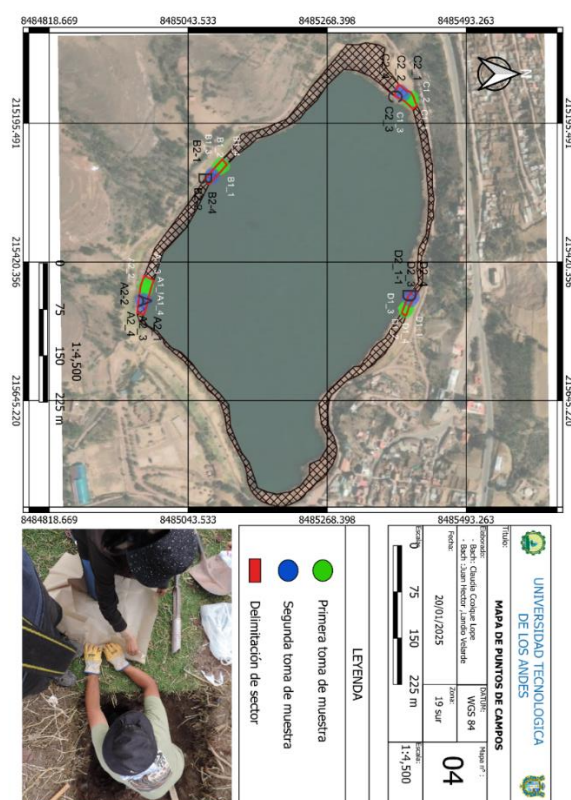
- Totora aérea (8)
- Totora sumergida (8)
- Necromasa (8)
- Raíces gruesas (8)
- Raíces delgadas (8)

- Suelo 30 cm (8)
- Suelo 60 cm (8)
- Suelo 100 cm (8)

Esto datos resultaron en un total de 64 muestras llevadas al laboratorio de suelos de la universidad de lima para obtener carbono de la metodología de Walkley y black. Este diseño de muestreo es consistente con metodologías empleadas en los estudios de almacenamiento de carbono en humedales altoandinos (Morocco, 2014; Huamani, 2015; Alvis, 2018).

Figura. 6.

Ubicación de los puntos de toma de muestra en la laguna de Urcos



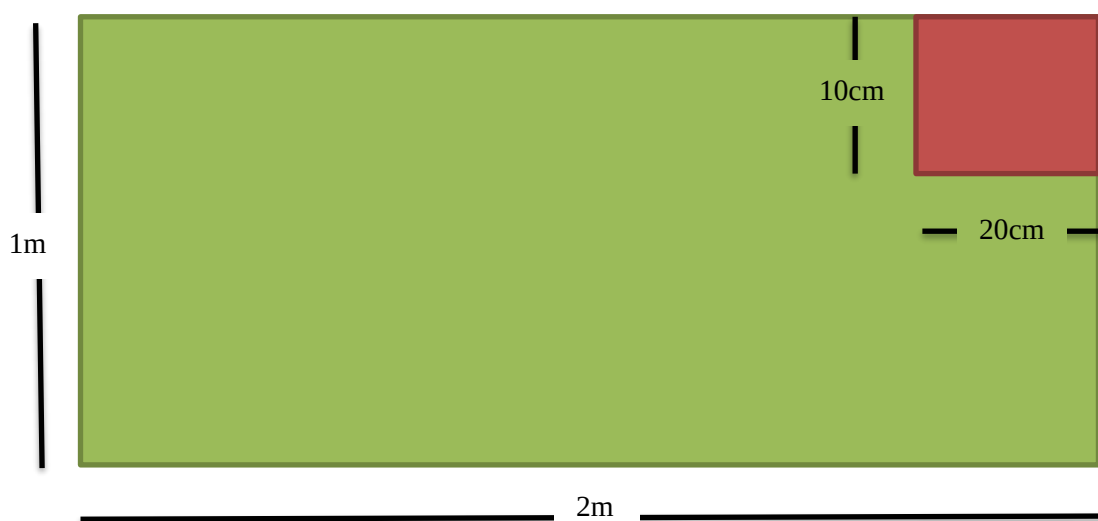
Nota. Se seleccionaron dos puntos de muestreo en cada una de las localizaciones A, B, C y D e identificadas con punto verde (primera toma de muestra) y azul (segunda toma de muestra) respectivamente; la red de color negro representa el totoral que rodea la laguna.

Figura. 7*Recolección de muestras de vegetación**Nota.* Delimitación del área de muestro con uso de estacas y rafia**Figura. 8***Recolección de la biomasa aérea**Nota.* Se utilizo un marco con las medidas especificadas según la metodología del *INIA* para la extracción total de la biomasa

Las zonas de extracción de muestras se delimitaron en parcelas de 20 m × 20 m, donde se evaluaron dos cuadrantes de 2 × 1 m² seleccionados aleatoriamente, considerando la homogeneidad de la cobertura vegetal (SERFOR, 2017). En estos cuadrantes, se recolectó la biomasa de totoral completa al nivel del suelo, la cual se concentró en bolsas para posterior análisis; de acuerdo con protocolos establecidos, se obtuvieron submuestras aproximadas de 300 g para cuantificación de carbono (Cuéllar & Salazar, 2016). Las muestras de suelo, equivalentes a un volumen de 1 m³, se extrajeron en las áreas marcadas en verde inmediatamente después de la remoción del totoral, siguiendo lineamientos para perfiles profundos en humedales (MINAM, 2014).

Figura. 9

Distribución en el cuadrante



Nota: El color verde representa la extracción de totora aérea, totora sumergida, raíces gruesas, raíces delgadas; el color rojo representa la zona de extracción de necromasa que mientras permanezca en la zona verde puede variar el lugar de extracción de necromasa.

4.4. Instrumentos

4.4.1. Fuentes primarias

Observación directa, fotografías, fichas de campo y recojo de información y muestras de suelo y biomasa in situ. Muestras de laboratorio, de biomasa y suelo la cual será sometida a la prueba de Walkley-Black

- Manejo de las muestras de fuente primaria
- Realizado la recolección de las muestras se procedió el análisis de laboratorio siguiendo los pasos.
- Secado de muestras (vegetal y suelo)
- Registra peso fresco de las muestras
- Se secarán las muestras de vegetación en un horno a 65 °C durante 48 horas hasta no encontrara variaciones en el peso.
- Cálculo de biomasa seca
- Se determinará el peso seco y se calculará el factor de conversión entre biomasa fresca y seca.
- Análisis de carbono almacenado: Se utilizará el método Walkley-Black

4.4.2. Fuentes secundarias

Imagen satelital con el fin de identificar el área total del totoral. Análisis de documentos, se revisó material bibliográfico

4.5. Procedimiento

Para la cuantificación del carbono en la biomasa vegetal es la metodología estandarizada que es elaborado por The world Agroforestry centre (ICRAF); en el Manual de Determinación de las reservas totales de carbono en los distintos sistemas de uso de la Tierra en Perú. (Arévalo

et al., 2003). Para la numeración del carbono en el suelo se utilizará el método de Walkley-Black.

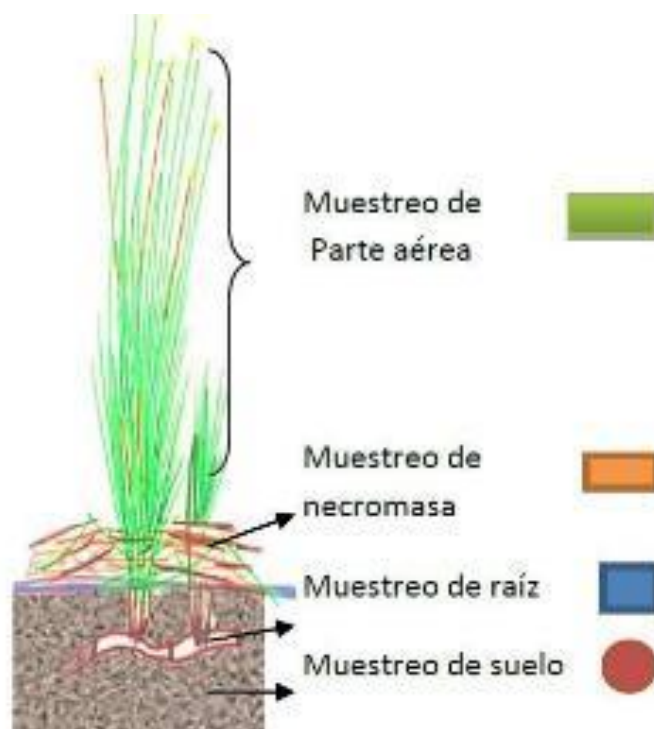
Para la recolección de muestras en laboratorio se tomó a la especie hidrofílica *Typha angustifolia* la cual es la especie predominante escogida para el presente estudio, en la determinación de la cantidad de carbono almacenado en biomasa, biomasa muerta y raíz.

4.5.1. Procedimiento para extracción de raíces y rizomas

Se extrajeron raíces y rizomas hasta 20 cm de profundidad en un área de 20 cm *10 cm (figura 9), utilizando marcos dentro del cuadrante principal (Brown, 2002). Las raíces delgadas se separaron del suelo mediante lavado y tamizado con mallas de diferentes tamaños. Se recolectaron 8 muestras de raíces gruesas y 2 de raíces delgadas, con una profundidad de extracción de hasta 1 m en algunos casos. No es relevante la zona exacta dentro del cuadro de madera de 1 m × 2 m, ya que este se destina principalmente a la totora aérea. Se pesaron las muestras en campo para obtener el peso fresco, se empaquetaron indicando el punto de muestreo, se rotularon y se tomó una submuestra aproximada de 500 g. Posteriormente, todas las muestras se trasladaron al laboratorio de aguas, suelo y aires de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Tecnológica de los Andes (Biodisol, 2025).

Figura. 10

Diagrama de partes muestreadas



Nota: Imagen tomada Biodisol.(2025)

Figura. 11

Extracción de raíces gruesas



Nota. En la zona delimitada del marco 2m *1m se realizó la extracción completa de las

muestras.

4.5.2. Procedimiento para recolección de totora

Con referencia a los puntos de muestreo delimitados, se cortó la biomasa aérea (hojas y tallos) contenida dentro del cuadrante de $2\text{ m} \times 1\text{ m}$, utilizando segadera y tijeras de podar. Todas las muestras extraídas se recolectaron, pesaron en proximidades del sitio (registrando solo 100 g del peso fresco total por submuestra) y se almacenaron en bolsas etiquetadas. Se rotularon detalladamente según el punto y tipo de muestra, y se trasladaron al laboratorio para análisis de carbono (Huamani, 2015).

Figura. 12

Muestreo de biomasa aérea



Nota: Se hizo la recolección de muestra y posteriormente su debido pesaje

4.5.3. Procedimiento para extracción de necromasa

La necromasa se extrajo en un cuadro de $20\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, removiendo todo el interior hasta tocar el suelo, obteniendo un total de 8 muestras. Se utilizó un marco de madera como referencia para delimitar la zona de recolección total. El material se pesó en campo, se empaquetó y rotuló, asegurando trazabilidad (Brown, 2002).

Figura. 13

Marco referencia para muestreo de necromasa



Nota: El marco de madera delimita en la cual se hará la recolección total de la necromasa

4.5.4. Procedimiento para muestreo de suelo

Se delimitó un área de 1 m² para iniciar la excavación con pico, pala, barreta y muestreador cilíndrico manual (auger Mole, "topo") de 5.5 cm de diámetro × 20 cm de longitud, con cabezal de perforación templado y empuñadura de 75 cm. Las muestras se extrajeron a profundidades de 30 cm, 60 cm y 100 cm, retirando un total de 1 m³ de suelo por punto y recolectando 24 muestras en total. Se obtuvieron cilindros intactos para densidad aparente, se realizó cuarteo para una muestra representativa de 4 kg (dividida en pesajes múltiples si era necesario) y se revistieron para preservar la estructura. Las muestras se almacenaron en bolsas de papel (para evitar alteraciones por humedad y estimar materia orgánica) o herméticas, rotulándolas por profundidad y punto. Finalmente, se pesaron y trasladaron al laboratorio para determinar concentración de carbono (MINAM, 2015).

Figura. 14

Pesaje de muestras de suelo



Nota. Al finalizar la extracción de cada punto de muestra, se hizo un cuarteo para obtener una muestra representativa de 4kg. En relación al tamaño de la balanza se hizo varios pesajes para llegar al peso ideal.

Figura. 15

Obtención de muestra de suelo a 1 metro de profundidad



Nota.: Se utilizó un auger manual (muestreador cilíndrico para suelos) para la extracción de muestras de suelo a 1 metro de profundidad.

Figura. 16

Recolección de muestras con el muestreador



Figura. 17.

Auger manual



Nota. Descripción detallada del equipo: tubo biselado 5.5 cm Ø × 20 cm, empuñadura 75 cm.)

Figura. 18

Revestimiento de muestras de densidad de suelo



Nota. De las medidas propuestas según la metodología, se realizó el revestimiento de cada cilindro, preservando las mismas.

Figura. 19

Pesaje de muestras de suelo



Nota. Las muestras representativas son clasificadas en relación al lugar de extracción y número de punto.

4.5.5. Procedimiento en fase de laboratorio y gabinete

Las muestras (titora aérea, titora sumergida, necromasa, raíces y suelo) se pesaron húmedas, se clasificaron y almacenaron individualmente en bolsas de papel con cierre hermético (Ziploc), identificadas por componente. El secado se realizó durante 72 h a 65 °C en estufa del laboratorio de la universidad. Posteriormente, las muestras secas se molieron hasta pasar tamiz de 0.5 mm, de esta forma se discrimina las raíces y piedras en la muestra. El contenido de carbono orgánico se determinó mediante el método de oxidación húmeda Walkley-Black (Walkley & Black, 1934), el cual emplea una mezcla de dicromato potásico y ácido sulfúrico concentrado que oxida selectivamente el carbono orgánico presente en la muestra, sin atacar significativamente el carbono elemental ni los carbonatos. Por esta razón, el carbono cuantificado corresponde exclusivamente al carbono orgánico (excluyendo hidrógeno, oxígeno y nitrógeno unidos en compuestos inorgánicos), lo que permite reportarlo como carbono orgánico del suelo y de la biomasa con la precisión requerida para estudios de secuestro de carbono en humedales altoandinos.

Figura. 20

Muestra en el laboratorio



Nota. Se hizo la clasificación de las muestras extraídas en campo.

Figura. 21

Proceso de secado en el laboratorio.



Nota. Las muestras de suelo se colocaron en diversas bandejas de aluminio, las cuales se etiquetaron previamente al colocarlas al horno, se procuró que las muestras estuvieran dispersas para maximizar su secado.

Figura. 22

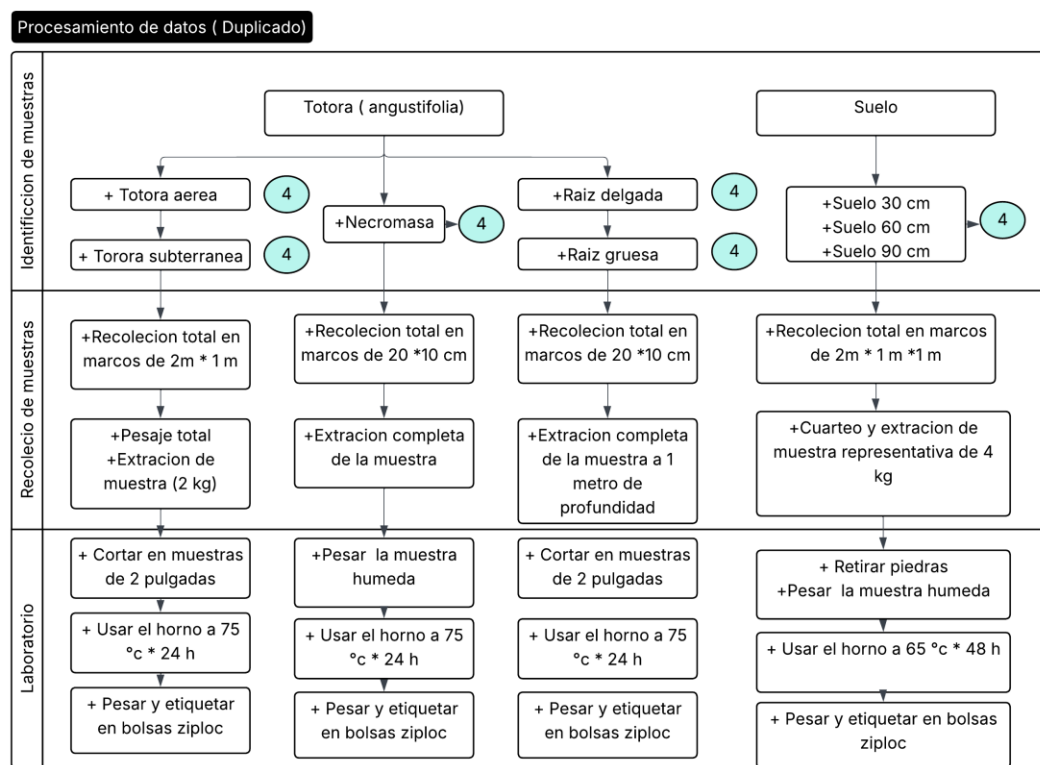
Clasificación de muestras



Nota. Se realizó el rotulado de todas las muestras obtenidas en campo

Figura 23

Representación detallada del procedimiento



Nota. Los valores representados con número 4 significa las tomas de muestras iniciales por cada punto de muestreo, de igual manera se trabajó con una réplica de los puntos para tener 8 datos por cada componente.

4.5.6. Procedimiento de análisis estadístico

Los datos de carbono orgánico expresados en tn/ha se derivaron de las mediciones realizadas por componente en 4 posiciones (A, B, C, D). El contenido de carbono orgánico en suelo y necromasa se determinó mediante el método de oxidación húmeda Walkley-Black (Walkley & Black, 1934), mientras que el carbono orgánico en la biomasa viva de totora (totora aérea, totora sumergida, raíz gruesa y raíz delgada) se obtuvo a partir de biomasa fresca y seca medida in situ, porcentaje de materia seca y porcentaje de carbono en laboratorio, aplicando ecuaciones alométricas y factores de conversión validados para *Schoenoplectus californicus*

subsp. tatora en humedales altoandinos (MINAM, 2015; Huamani, 2015; Gutiérrez, 2017). El muestreo de todos los compartimentos se realizó simultáneamente en los mismos puntos para garantizar comparabilidad, siguiendo protocolos estandarizados para ecosistemas de totoral altoandino.

Prueba de Normalidad

Se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965) en el software InfoStat para evaluar la normalidad de los datos de carbono almacenado en cada uno de los ocho componentes del ecosistema (tatora aérea, tatora sumergida, raíz gruesa, raíz delgada, necromasa y suelo a 0–30 cm, 30–60 cm y 60–100 cm), realizándose una prueba independiente por cada componente ($n = 8$ datos por componente: 4 posiciones con una medición original y una réplica analítica). Esta prueba fue seleccionada por su alta potencia cuando el tamaño muestral es reducido (< 50 observaciones), como ocurre en el presente estudio, permitiendo detectar desviaciones de la normalidad con mayor sensibilidad (Field, 2018).

Hipótesis Específica 1

Se comparó la media de biomasa total (89.7 t/ha) con 50 t/ha, valor promedio regional de referencia en totorales altoandinos (Basurto Salvatierra, 2022), mediante una prueba t de una muestra implementada en SciPy (Python). Esta prueba evalúa si la media poblacional difiere significativamente de un valor hipotético conocido, siendo especialmente adecuada para muestras pequeñas ($n = 8$)

Pruebas Post-Hoc

Se evaluó si la biomasa viva del totoral distribuye el **carbono orgánico** de forma homogénea entre sus cuatro componentes (tatora aérea ≈ 40 tn/ha, raíz gruesa ≈ 41 tn/ha, tatora sumergida ≈ 2.7 tn/ha y raíz delgada ≈ 2.7 tn/ha de **carbono orgánico**; datos extraídos de la Tabla 15). Para ello se realizó un **ANOVA de una vía con medidas repetidas** ($n = 8$ por componente), considerando la posición como bloque (Field, 2018). Al obtenerse diferencias

globales altamente significativas ($F_{(3,21)} = 189.4$, $p < 0.001$), se aplicaron **pruebas post-hoc de Tukey HSD ($\alpha = 0.05$)** con el objetivo de identificar cuáles componentes específicos presentaban diferencias significativas y delimitar grupos homogéneos (Tukey, 1949).

Hipótesis específica 3

Se evaluó si la necromasa almacena más carbono que el suelo en cada horizonte (0–30 cm, 30–60 cm y 60–100 cm) mediante una prueba t de Student para muestras pareadas ($n = 8$). Esta prueba fue seleccionada porque las mediciones de necromasa y de carbono del suelo se realizaron exactamente en la misma parcela experimental, permitiendo comparar directamente los pares de datos, eliminar la variabilidad espacial entre sitios, controlar el efecto del lugar y aumentar la potencia estadística de la comparación (Field, 2018).

4.6. Análisis de datos

4.6.1. Cálculo de carbono por componente

Para determinar en base a los datos las unidades de medición se usó las siguientes formulas (Goslee et al., 2019). Cálculo de porcentaje de humedad (vegetación)

$$\%H = \frac{P_h - P_s}{P_s} \quad (1)$$

Donde:

%H: Porcentaje de humedad en kg/m^2

P_h = Peso húmedo de la muestra en kg/m^2

P_s = Peso seco de la muestra en kg/m^2

C% = Carbono orgánico contenido en el suelo en toneladas por hectárea (vegetación)

$$C = C\% * P_s * 1 / 10 \quad (2)$$

Donde:

C = Carbono en toneladas por hectárea (tn/ha)

C% = Porcentaje de carbono determinado en laboratorio

P_s = Peso seco de la muestra en kg/m²

1/10 = Factor de conversión de unidades (kg/m² a tn/ha)

La muestra enviada al laboratorio de suelos de la universidad de la molina nos permite tener el cálculo de % de carbono orgánico que se trabaja sobre muestras secas razón por la cual se debe tomar el peso seco de la muestra estimado a kg por metro cuadrado se usa la conversión de mil entre 10 mil para convertirlo en unidad de toneladas hectárea.

4.6.2. Cálculo de densidad del suelo

$$ds = \frac{Ms}{V} \quad (3)$$

Donde:

ds=Densidad aparente del suelo (g/cm³)

Ms=Masa del suelo seco a 105 ° (g)

V=Volumen del cilindro (cm³)

4.6.3. Cálculo de carbono en suelo

$$C = C\% * ds * 10\,000 \quad (4)$$

Donde:

C = Carbono organico (tn/ha)

C% = Porcentaje de carbono organico determinado en laboratorio

ds = Densidad aparente del suelo (g/cm³)

10000 = Factor de conversión de unidades (g/cm³ a tn/ha)

El C% corresponde al carbono orgánico del suelo determinado mediante el método de Walkley-Black (oxidación húmeda con dicromato), que cuantifica específicamente el carbono orgánico oxidable del suelo (Walkley & Black, 1934; Nelson & Sommers, 1996).

4.6.4. Carbono total por hectárea

Para determinar el peso del carbón en toneladas contenido por hectárea total se estimó

como la suma de los aportantes suelo y totora

$$CT = C_{\text{suelo}} + C_{\text{totora AS}} + C_{\text{totora raiz}} + C_{\text{necromasa}} \quad (5)$$

Donde:

CT = Carbono total en toneladas por hectárea (tn/ha)

C_{suelo} = Carbono del suelo en toneladas por hectárea (tn/ha)

C_{totoraAS} = Carbono de la totora aérea y sumergida en toneladas por hectárea (tn/ha)

C_{totoraraiz} = Carbono de raíces de totora en toneladas por hectárea (tn/ha)

C_{necromasa} = Carbono de la necromasa en toneladas por hectárea (tn/ha)

4.6.5. Conversión a CO₂

$$CO_2 = CT \times 3.6667 \quad (6)$$

Donde:

CO₂ = Dióxido de carbono (tn/ha)

CT = Carbono total en toneladas por hectárea (tn/ha)

3.67 = Factor de conversión de carbono organico a dióxido de carbono (relación molecular CO₂ /C)

Con los datos mencionados y conversiones explicadas se realizará el análisis estadístico de los datos mediante el uso de promedios y desviaciones estándar cuadros de frecuencia y gráficos.

El análisis estadístico se desarrolló en dos niveles principales: descriptivo e inferencial. En primer lugar, se realizó un análisis descriptivo en el que se calcularon las medias aritméticas, desviaciones estándar, coeficientes de variación, valores mínimos, máximos y rangos para cada componente de carbono (biomasa aérea, biomasa muerta, raíces gruesas y delgadas, y suelo en diferentes profundidades). Se optó por utilizar la prueba de ANOVA para determinar si existían diferencias significativas en los niveles de carbono entre los puntos de muestreo. Para

identificar entre qué puntos específicos se daban estas diferencias, se realizó una prueba post-hoc de Tukey.

La representación gráfica de los resultados fue fundamental para comunicar de manera clara y efectiva los hallazgos del estudio. Se elaboraron gráficos de barras apiladas que mostraron la contribución relativa de cada componente (suelo, biomasa aérea, raíces y biomasa muerta) al carbono total almacenado. Se construyeron perfiles verticales de carbono que ilustraron su disminución progresiva con la profundidad (0–30 cm, 30–60 cm y 60–100 cm),

Se empleó para ello la metodología de Cuellar et al. (2017), usando una imagen satelital Landsat 8 y el Software QGIS 2.68 (versión de prueba gratuita), para delimitar solamente el área de humedales.

4.7. Consideraciones éticas

Durante el desarrollo de esta investigación se actuó con responsabilidad, transparencia y respeto por los principios éticos. Toda la información presentada proviene de fuentes reales, obtenidas de manera formal y directa en el campo, sin alterar ni manipular los datos. Las muestras recolectadas fueron mínimas y se extrajeron con cuidado para no afectar el ecosistema de la laguna de Urcos. Se respetaron los derechos de autor citando correctamente a cada fuente consultada, siguiendo las normas APA. Además, se evitó cualquier tipo de copia o apropiación indebida de información. Este trabajo busca aportar conocimientos útiles en el campo ambiental sin comprometer la integridad científica ni el entorno natural.

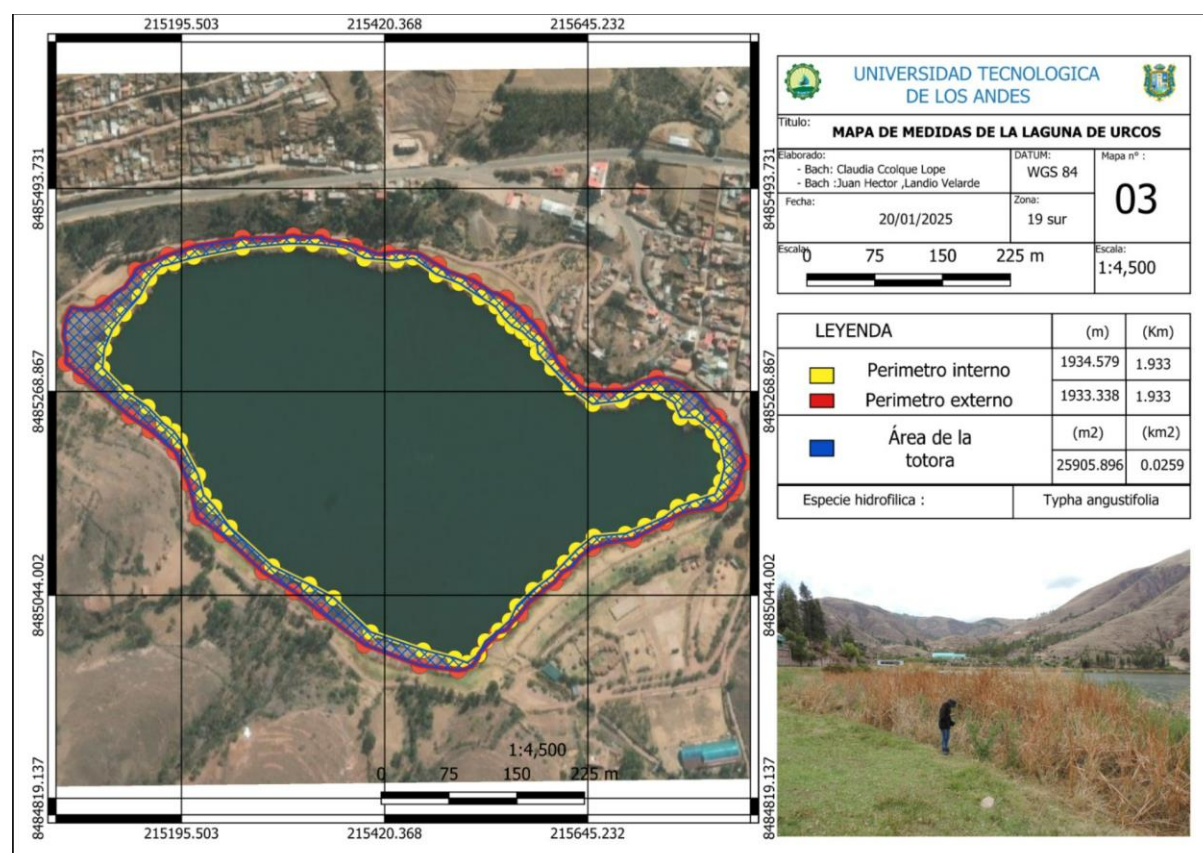
V. Resultados y Discusión

5.1. Resultados

5.1.1. Caracterización del estudio

Figura. 24

Laguna de Urcos Quispicanchis y área de totoral



Nota. La imagen muestra un mapa elaborado con software GIS que delimita las dimensiones de la Laguna de Urcos y su área de totoral.

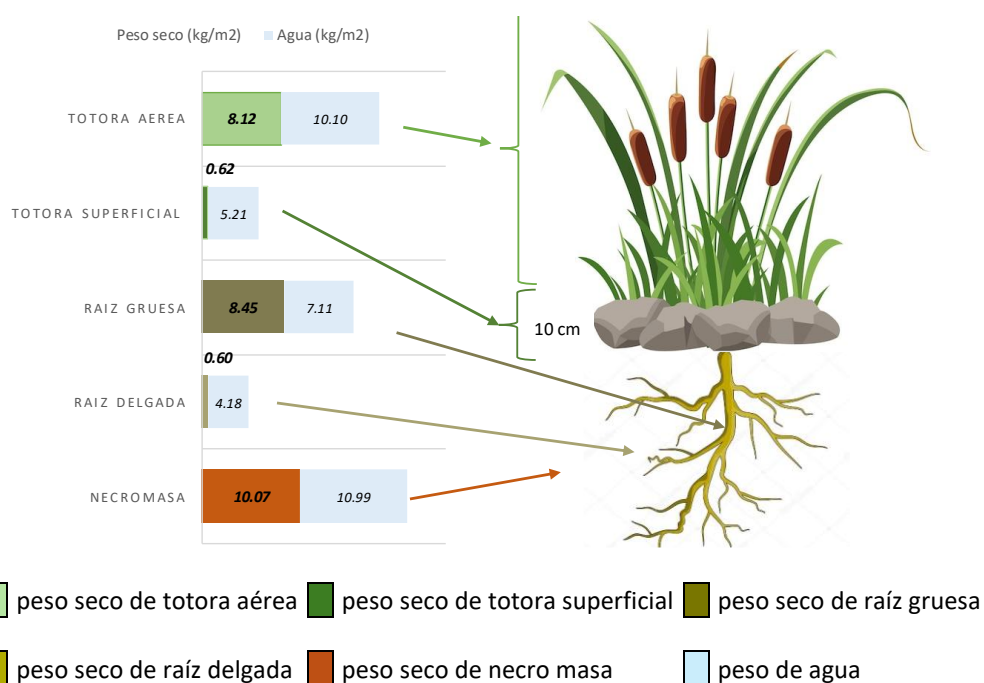
1. Perímetro interno (amarillo): 1,934.579 metros (~1.933 km).
2. Perímetro externo (rojo): 1,933.338 metros (~1.933 km).
3. Área de totoral (azul sombreado): 25,905.896 m² (~2.5905 ha).

El área del totoral ha sido estimada en 2.5905 hectáreas, mientras que la laguna ocupa

17.8129 hectáreas. Esto implica que el totoral representa una fracción importante del ecosistema de la laguna, sirviendo funciones ecológicas clave como la filtración del agua, el hábitat para fauna silvestre y la regulación de la erosión en la zona ribereña. El grafico proporciona las dimensiones espaciales necesarias para calcular las reservas de carbono en este ecosistema.

Figura. 25.

Características del totoral



Nota: Se visualiza la pérdida de agua que posee cada parte de la totora estudiada después de su ingreso al horno.

Tabla 3.*Características del totoral*

Tipo	Peso de agua Kg/m ²	Humedad %	Peso seco Kg/m ²
Totora aérea	18.22	55.60	8.12
Superficial totora	5.83	89.00	0.62
Raíz gruesa	15.56	45.80	8.45
Raíz delgada	4.78	87.40	0.60
biomasa muerta	21.06	52.20	10.07

Notas. Se visualiza en la tabla el porcentaje de perdida que tiene las diferentes partes de la totora al ser sometidas al horno.

La figura 25 y la tabla 3 presentan las características estructurales del totoral en términos de peso seco, peso húmedo y contenido de humedad, permitiendo un análisis, en el cual la suma de suelo seco más agua es el resultado de suelo húmedo.

La totora aérea, que corresponde a la parte emergente de la planta, muestra un peso húmedo de 18.22 kg/m², de los cuales 55.60% corresponde a agua y 8.12 kg/m² a materia seca, lo que sugiere una estructura fibrosa y resistente a la descomposición.

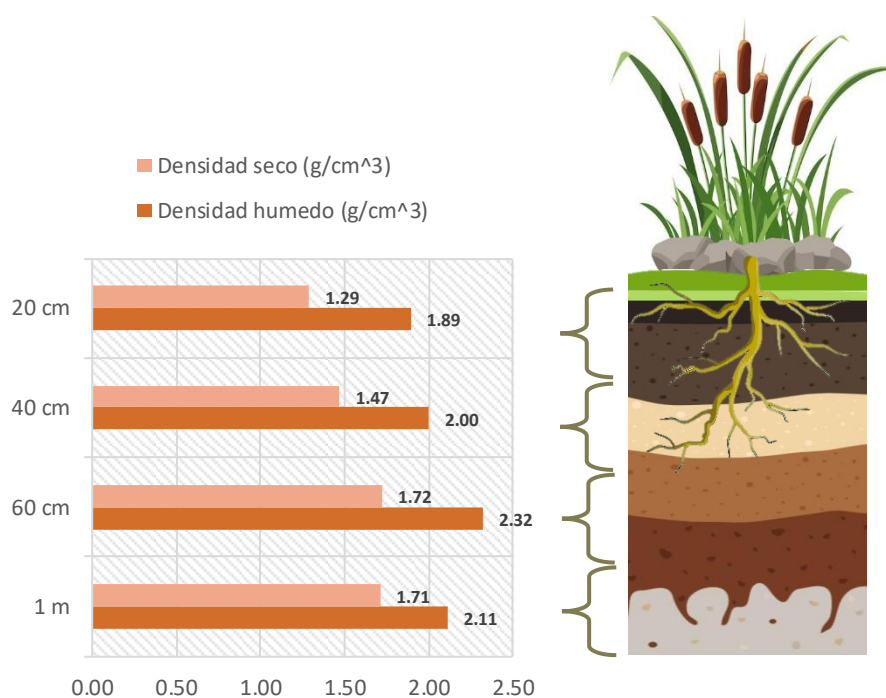
La totora superficial, que incluye la base de los tallos más cercanos al suelo, presenta un peso húmedo mucho menor 5.83 kg/m² con un porcentaje de humedad muy alto 89.00%. Su peso seco es solo de 0.62 kg/m², evidenciando que esta fracción de la planta tiene una gran capacidad de retención de agua y una baja densidad estructural indicándonos que son los tallos y hojas de brote tierno de la planta.

En cuanto al sistema radicular, se distingue entre raíces gruesas y delgadas. Las raíces gruesas tienen un peso húmedo de 15.56 kg/m², con una humedad del 45.80%, lo que significa que casi la mitad de su masa está compuesta por agua. Su peso seco es de 8.45 kg/m², las raíces delgadas tienen un peso húmedo de 4.78 kg/m² y una humedad del 87.40%, con un peso seco de solo 0.60 kg/m². Esta alta retención de agua sugiere que son estructuras finas y altamente hidratadas.

La biomasa muerta (material vegetal en descomposición) presenta el mayor peso húmedo de 21.06 kg/m², con un contenido de agua del 52.20% y un peso seco de 10.07 kg/m², siendo el componente más pesado de la biomasa del total. Este valor refleja una gran acumulación de material orgánico en diferentes estados de descomposición.

Figura. 26

Características del suelo



Nota: En esta figura se observan cómo varían la humedad del suelo y su densidad (húmeda y seca) a diferentes profundidades.

Tabla 4.*Características del suelo*

Profundidad	Densidad del Suelo húmedo g/cm ³	Humedad Del suelo %	Densidad del Suelo seco g/cm ³
20	1.89	32.13	1.29
40	2.00	26.32	1.47
60	2.32	25.57	1.72
100	2.11	19.22	1.71
Total(promedio)	2.08	24.33	1.57

La figura 26 y la tabla 4 muestran las características del suelo en diferentes profundidades, considerando la densidad del suelo en estado húmedo y seco, así como su contenido de humedad. El análisis revela cómo varían estos parámetros conforme aumenta la profundidad

A 20 cm de profundidad, el suelo presenta una densidad húmeda de 1.89 g/cm³ y una densidad seca de 1.29 g/cm³, con un contenido de humedad del 32.13%, el más alto registrado en la tabla. Esto sugiere que la capa superficial del suelo retiene una mayor cantidad de agua, probablemente debido a su contacto directo con la vegetación y el agua de la laguna.

A 40 cm, la densidad húmeda aumenta a 2.00 g/cm³, mientras que la densidad seca sube a 1.47 g/cm³, con una reducción del contenido de humedad al 26.32%. Este cambio indica un suelo más compacto con menor capacidad de retención de agua a medida que se profundiza.

A 60 cm de profundidad, se observa un incremento significativo en la densidad del suelo húmedo (2.32 g/cm³) y seco (1.72 g/cm³) mientras que la humedad sigue disminuyendo a 25.57%. Con una mayor compactación del suelo, lo que puede reducir la infiltración de agua y aumentar la resistencia a la penetración de raíces.

A 1 metro de profundidad, la densidad húmeda disminuye a 2.11 g/cm³ y la densidad seca se mantiene en 1.71 g/cm³, con la humedad más baja registrada (19.22%). Este comportamiento

podría deberse a la presencia de capas más compactas con menor porosidad, lo que limita la capacidad del suelo para retener agua.

En términos generales, los valores promedio para el suelo muestran una densidad húmeda de 2.08 g/cm^3 , una densidad seca de 1.57 g/cm^3 y un contenido de humedad del 24.33%. La tendencia observada indica que, a mayor profundidad, el suelo se vuelve más denso y compacto, con menor contenido de humedad.

El suelo puede clasificarse como un suelo franco-arenoso con compactación moderada, con una tendencia a ser más denso en capas profundas con algo de tendencia arcillosa.

Figura. 27

Perfil de densidad del suelo húmedo con profundidad

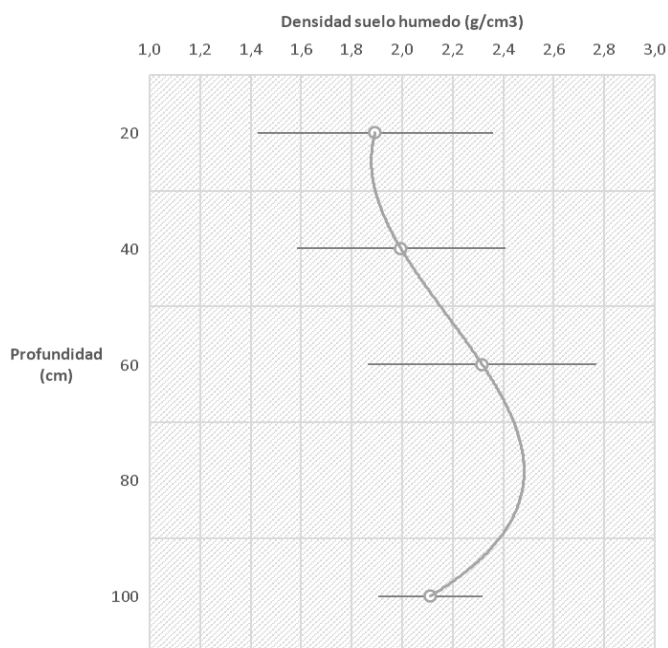
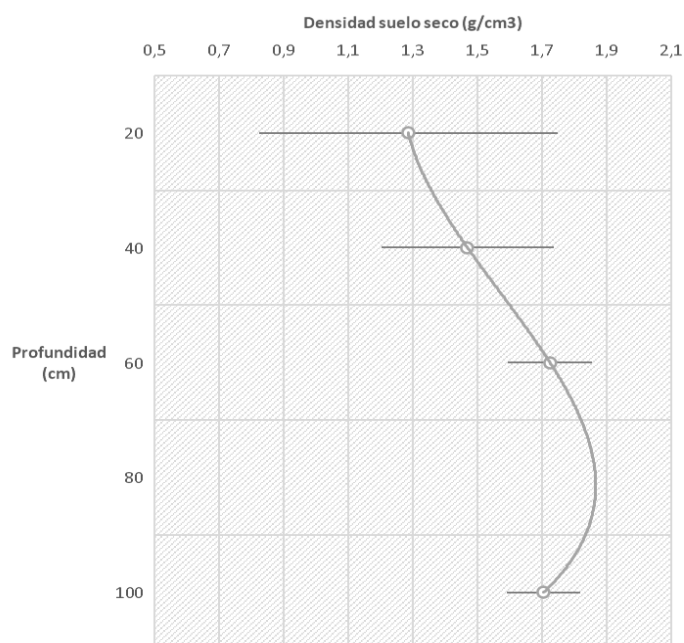
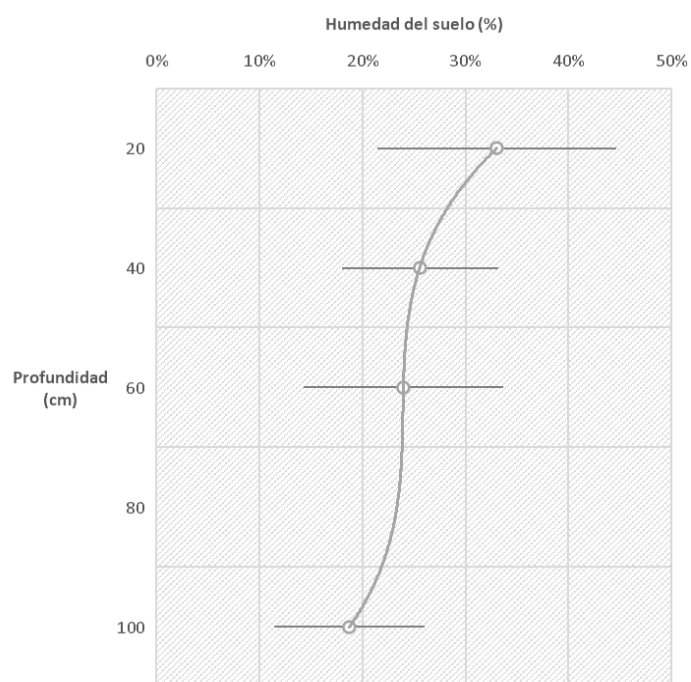


Figura. 28*Perfil de densidad del suelo seco con profundidad***Figura. 29***Perfil de humedad del suelo en relación a la profundidad*

Nota. Perfil de humedad del suelo en el total de la laguna de Urcos, representando la variación continua con la profundidad (sin división en horizontes tradicionales). Se adoptó este enfoque continuo en lugar de horizontes discretos para capturar mejor la dinámica del carbono en suelos anóxicos de humedales, tal como se enfatiza en Cuellar & Salazar (2016).

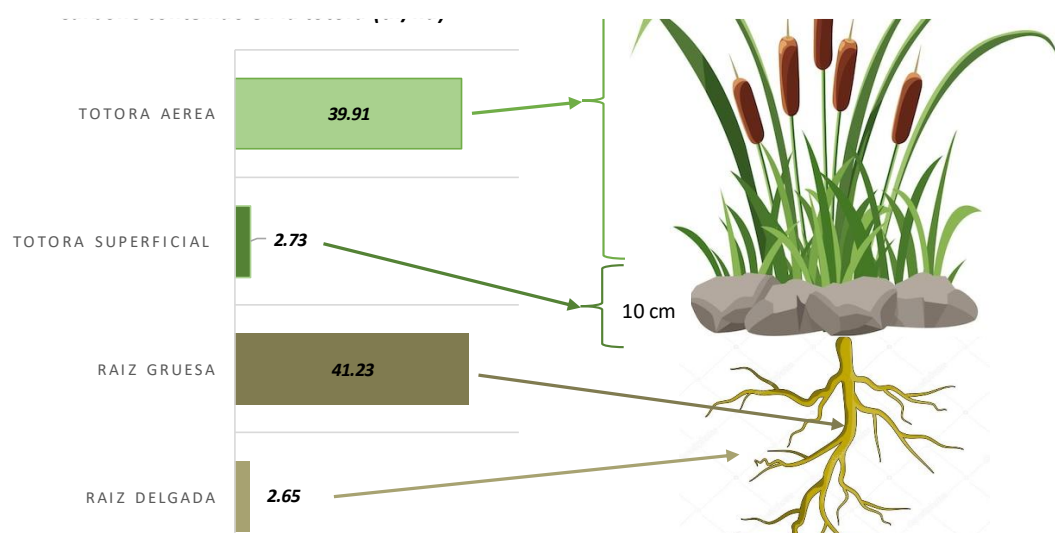
Las figuras 27, 28 y 29 muestran la variación de la densidad y humedad del suelo en función de la profundidad. Donde la línea del medio indica el valor promedio de la medición la amplitud de la línea está determinada por el valor máximo y mínimo medio en esa profundidad. La Figura 27 indica que la densidad del suelo húmedo oscila entre aproximadamente 1.6 y 2.2 g/cm³, con una tendencia a aumentar con la profundidad hasta los 100 cm. La Figura 28 muestra un comportamiento similar para la densidad del suelo seco, con valores que varían entre aproximadamente 1.2 y 1.6 g/cm³, lo que sugiere una compactación progresiva del suelo en niveles más profundos. La Figura 29 presenta la humedad del suelo, la cual tiende a disminuir conforme aumenta la profundidad, con valores iniciales cercanos al 30-35 % en los primeros centímetros y reduciéndose hasta alrededor del 20-25 % en los estratos más profundos. Esta relación entre densidad y humedad indica que los niveles superficiales del suelo tienen mayor porosidad y retención de agua, mientras que los niveles más profundos son más compactos y menos húmedos.

5.1.2. Carbono contenido en la totora

Figura. 30

Carbono contenido en la totora y suelo

- carbono superficial de totora .
 carbono superficial de la totora superficial .
- carbono subterráneo de raíz gruesa .
 carbono superficial de raíz delgada .



Nota. La figura 30 muestra el contenido de carbono (en toneladas por hectárea) almacenado en la planta de totora, separado en dos compartimentos: superficial (parte aérea y superficial) y subterráneo (raíces gruesas y delgadas).

Tabla 5*Carbono contenido en la totora*

Fuente		Carbono tn/ha				Promedio
		A	B	C	D	
Carbono superficial	Totora	87.04	23.90	31.76	16.93	39.91
	Totora superficial	2.56	2.60	3.16	2.61	2.73
	Total	89.60	26.50	34.92	19.55	42.64
Carbono subterráneo	Raíz gruesa	37.16	49.62	47.20	30.94	41.23
	Raíz delgada	2.38	2.62	3.02	2.58	2.65
	Total	39.55	52.23	50.22	33.52	43.88

La Figura 30 y las Tablas 5 presentan la distribución del contenido de carbono en la totora, diferenciando entre la biomasa aérea y la biomasa subterránea. Los valores de carbono están expresados en toneladas por hectárea (tn/ha) y permiten comparar la capacidad de almacenamiento en diferentes partes de la planta.

En la biomasa aérea (Tabla 5), la mayor cantidad de carbono se encuentra la posición muestral A, con 87.04 tn/ha, mientras que posición D registra el menor contenido con 16.93 tn/ha. Las fuentes B y C presentan valores intermedios de 23.90 y 31.76 tn/ha, respectivamente. En promedio, el carbono contenido en la biomasa aérea de la totora alcanza 39.91 tn/ha. En cuanto al carbono contenido en la totora superficial (menos de 10 cm sobre el suelo), los valores son significativamente menores en comparación con la totora aérea, con un promedio de 2.73 Tn/ha. Las muestras de la posición C muestra el mayor valor (3.16 tn/ha), mientras de la posición A tiene la menor concentración de carbono (2.56 tn/ha).

En la biomasa subterránea (Tabla 4), se observa que la raíz gruesa es la que más carbono almacena, con un promedio de 41.23 tn/ha. Dentro de este grupo, las muestras de la posición B es la que tiene el mayor contenido (49.62 tn/ha), mientras que la fuente de muestras D tienen el menor valor (30.94 tn/ha). La raíz delgada, por otro lado, contribuye con una menor

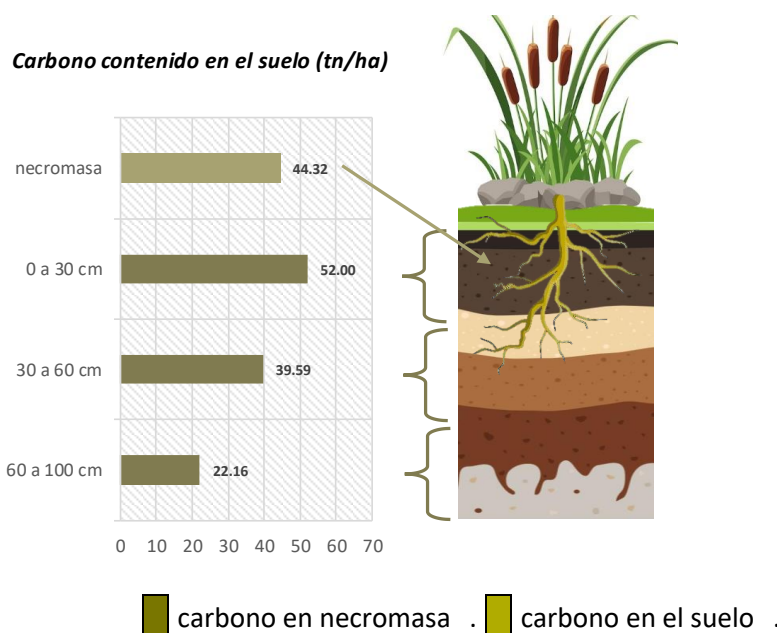
proporción al almacenamiento de carbono, con un promedio de 2.65 tn/ha, siendo las muestras de la posición C la que tiene el mayor valor (3.02 tn/ha) y las muestras de A la menor (2.38 tn/ha).

Al sumar el carbono aéreo y superficial (Tabla 3), se obtiene un total promedio de 42.64 tn/ha, mientras que la suma de carbono subterráneo (Tabla 4) da un total promedio de 43.88 tn/ha. Esto indica que la biomasa subterránea almacena ligeramente más carbono que la biomasa aérea, destacando especialmente la raíz gruesa como la principal reserva de carbono en la totora. La diferencia entre las posiciones muestrales siendo las posiciones A y B las que tienen los valores más altos en la biomasa aérea y subterránea.

5.1.3. Carbono contenido en el suelo

Figura. 31

Carbono orgánico contenido en el suelo



Nota: La necromasa se incluyó en el horizonte 0–30 cm por concentrarse mayoritariamente en la capa superficial del suelo orgánico, donde las condiciones anóxicas favorecen su preservación (Roa-García, 2016).

Tabla 6*Carbono contenido en el suelo*

Fuente	Carbono tn/ha				Promedio
	A	B	C	D	
Necromasa	47.67	53.82	37.04	38.74	44.32
Suelo 30 cm	39.18	53.30	24.11	91.43	52.00
Suelo 60 cm	49.33	41.03	22.07	45.93	39.59
Suelo 1 m	34.25	32.63	12.09	9.69	22.16
Total	170.43	180.78	95.31	185.79	158.07

La figura 31 y la tabla 6 presentan la distribución del carbono contenido en el suelo, diferenciando entre biomasa muerta y distintas profundidades del suelo.

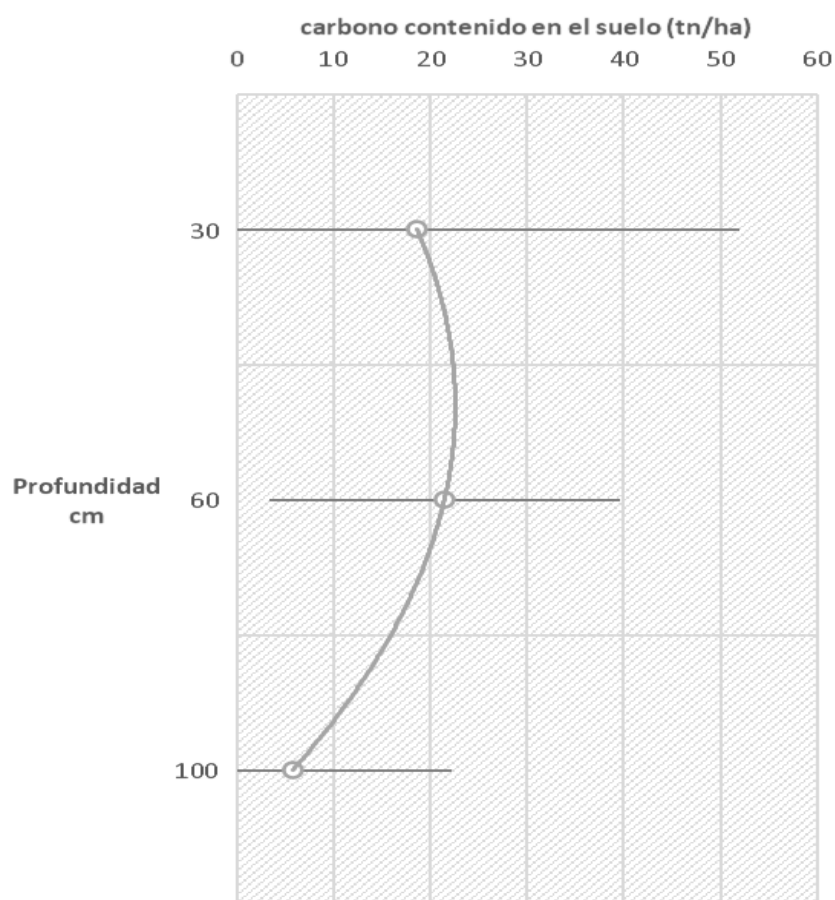
En términos generales, los valores más altos de carbono se encuentran en los primeros 30 cm del suelo, con un promedio de 52.00 tn/ha, lo que indica que la capa superficial es la que más carbono almacena. A esto le sigue la biomasa muerta, que representa restos orgánicos en descomposición, con un promedio de 44.32 tn/ha. A medida que aumenta la profundidad del suelo, la cantidad de carbono almacenado disminuye, observándose un valor de 39.59 tn/ha en la capa de 30 a 60 cm y el menor valor en la capa de 60 a 100 cm con 22.16 tn/ha.

Al analizar los valores por posiciones (A, B, C y D), se observa que la posición B es la que presenta el mayor contenido de carbono en la biomasa muerta (53.82 tn/ha), indicando una mayor acumulación de restos orgánicos en comparación con las otras posiciones. En la capa de 0 a 30 cm, el valor más alto se encuentra en la posición D con 91.43 tn/ha, lo que sugiere una acumulación excepcional de materia orgánica en esta zona. Para la capa de 30 a 60 cm, la mayor cantidad de carbono se encuentra en la posición A con 49.33 tn/ha, mientras que, en la profundidad de 60 a 100 cm, la misma posición A presenta el mayor valor con 34.25 tn/ha.

En la acumulación de carbono en el suelo, la posición A lidera con 83.58 tn/ha, seguida por la posición B con 73.66 tn/ha, la menor acumulación de carbono se encuentra en la posición C con apenas 34.15 tn/ha, lo que indica una menor capacidad de almacenamiento en esta ubicación.

Figura. 32

Perfil de carbono contenido en el suelo

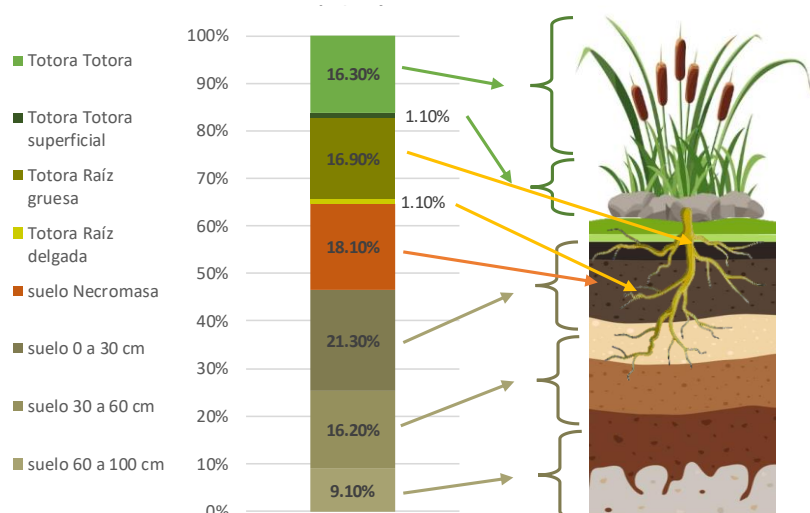


La Figura 32 muestra la disminución progresiva del carbono almacenado en el suelo con el aumento de la profundidad. La mayor concentración se encuentra en la capa de 0 a 30 cm, debido a la acumulación de materia orgánica y actividad biológica. A partir de los 30 cm, el contenido de carbono disminuye gradualmente, alcanzando su nivel más bajo entre 60 y 100 cm, lo que se explica por la menor presencia de material orgánico y actividad microbiana.

5.1.4 Carbono contenido en el totoral

Figura 33.

Carbono contenido en el suelo (tn/ha) y contenido total (tn/ha)



Nota. Distribución relativa del carbono orgánico total por compartimento en el totoral de la laguna de Urcos (base 100 % = 244,59 tC/ha). Suelo 0–100 cm + necromasa: 83,7 %; biomasa viva y muerta de la totora *Typha angustifolia*.

Tabla 7

Almacenamiento total del carbono y CO₂ en la laguna

Concepto	Unidad	Valor
Área total de la laguna	Hectáreas (ha)	2,5905
Densidad total de carbono	tn/ha	244,59
Carbono total contenido en la laguna	Toneladas (tn)	633,61
Co ₂ total equivalente contenido en la laguna	Toneladas (tn)	2322,81

Nota. La Densidad total de carbono (244,59 tn/ha} es el resultado de sumar el carbono almacenado en la biomasa de la totora (aérea y subterránea) y las capas del suelo hasta 1 metro

de profundidad.

La Figura 33 y la Tabla 7 presentan la distribución y el contenido total de carbono en la laguna, expresado en toneladas por hectárea (tn/ha) y su porcentaje correspondiente. En términos generales, el total de carbono almacenado en la laguna es de 244.59 tn/ha, lo que equivale a 63,61 tn considerando el área total de 2,5905 ha. En términos de CO₂ equivalente, este almacenamiento de carbono corresponde a 2322.81 tn de CO₂, lo que resalta la importancia de este ecosistema como un reservorio natural de carbono. Para ponerlo en perspectiva el carbono contenido en la laguna equivale a un bosque formado por 1267 árboles maduros donde cada uno contiene en promedio 0.5 tn de carbono donde este bosque ocuparía una extensión de 2.53 hectáreas en promedio de 500 árboles por hectárea. También se puede hacer comparación con CO₂ contenido donde un auto emite 4.6 toneladas promedio de CO₂ por año indicándonos que el carbono contenido en la laguna es equivalente a la emisión de 505 automóviles en un año.

Al analizar la distribución del carbono en los distintos compartimentos, se observa que la vegetación aérea (totorá aérea) contiene 42.64 tn/ha, lo que representa un 17.44% del total de carbono en la laguna. Dentro de este segmento de la biomasa de la totora aérea contribuye con 39.91 tn/ha (16,3%), mientras que la totora superficial representa 2.73 tn/ha (1.12%) La vegetación subterránea (raíces de totora) almacena 43.88 tn/ha, lo que equivale a un 17.94% del total. Donde las raíces gruesas contienen 41.23 tn/ha (16.86%), y las raíces delgadas 2.65 tn/ha (1.08%).

El segmento que almacena la mayor cantidad de carbono es el suelo y la biomasa muerta, con un total de 158.07 tn/ha, lo que representa 64.62% del carbono total. Dentro de este grupo, la biomasa muerta (materia orgánica en descomposición) aporta 44.32 tn/ha (18.12%). En cuanto a la distribución del carbono en el perfil del suelo, se observa que la capa más superficial (0 a 30 cm) tiene el mayor contenido, con 52.00 tn/ha (21.26%), seguida de la capa de 30 a 60

cm, con 39.59 tn/ha (16.19%), y finalmente la capa de 60 a 100 cm, con 22.16 tn/ha (9.06%).
 las capas más profundas hay menor acumulación de materia orgánica y menor actividad biológica por ende su concentración de carbón es baja.

Tabla 8.

Carbono CO₂ contenido según punto de muestreo

		Carbono tn/ha						
		Total	A	B	C	D	F cal.	Sig
Totora aérea	Totora	39.91	87.04 B	23.9 A	31.76 A	16.93 A	131.10	0.0002
	Totora superficial	2.73	2.56	2.60	3.16	2.61	0.62	0.6386
Totora subterránea	Raíz gruesa	41.23	37.16	49.62	47.20	30.94	5.47	0.0672
	Raíz delgada	2.65	2.38	2.62	3.02	2.58	2.45	0.2030
Suelo	Necromasa	44.32	47.67 AB	53.81 B	37.04 A	38.74 A	9.34	0.0280
	Suelo 30 cm	52	39.18	53.30	24.11	91.43	2.40	0.2084
	Suelo 60 cm	39.59	49.33	41.03	22.07	45.93	0.84	0.5383
	Suelo 1 m	22.16	34.25	32.63	12.09	9.69	1.62	0.3189
Total		244.59	299.58	259.51	180.45	238.86	2.17	0.2344

La Tabla 8 muestra cuánto carbono hay en diferentes partes del muestreo (A, B, C, D), en toneladas por hectárea. El análisis revela que hay diferencias estadísticamente significativas en la cantidad de carbono en la biomasa aérea de totora con un valor de sig. de 0.0002 y en la biomasa muerta del suelo (sig. = 0.0280). En particular el punto B presenta la mayor cantidad de materia orgánica muerta, con 53.81 tn/ha. el punto D tiene los niveles más bajos en biomasa aérea, llegando a 16.93 tn/ha. no se encontraron diferencias importantes en la biomasa en la superficie, raíces finas, ni en los suelos a 30 cm, 60 cm y 1 m de profundidad, ni en el total de carbono en general entre los diferentes puntos (sig. = 0.2344).

5.1.5 Resultados de muestreo de suelo

Tabla 9

Propiedades del Suelo: Densidad y Humedad

Posición	Repetición	Profundidad (cm)	Suelo húmedo (g)	Suelo seco (g)	Volumen muestra (cm³)	Densidad húmeda (g/cm³)	Densidad seca (g/cm³)	% Humedad
A	1	20	289.6	182.7	196.35	1.475	0.930	36.9
A	1	40	486.2	348.5	196.35	2.476	1.775	28.3
A	1	60	513.6	363.9	196.35	2.616	1.853	29.1
A	1	100	463.7	348.7	196.35	2.362	1.776	24.8
B	1	20	265.0	204.7	196.35	1.350	1.043	22.8
B	1	40	403.0	328.3	196.35	2.052	1.672	18.5
B	1	60	362.1	302.3	196.35	1.844	1.540	16.5
B	1	100	450.76	372.16	196.35	2.296	1.895	17.4
C	1	20	282.2	157.5	196.35	1.437	0.802	44.2
C	1	40	275.2	218.7	196.35	1.402	1.114	20.5
C	1	60	384.7	322.3	196.35	1.959	1.641	16.2
C	1	100	356.2	325.0	196.35	1.814	1.655	8.8
D	1	20	433.9	228.3	196.35	2.210	1.163	47.4
D	1	40	365.7	265.7	196.35	1.862	1.353	27.3
D	1	60	435.2	321.6	196.35	2.216	1.638	26.1
D	1	100	410.1	305.4	196.35	2.089	1.555	25.5
A	2	20	436.7	328.8	196.35	2.224	1.675	24.7
A	2	40	431.2	323.6	196.35	2.196	1.648	25.0
A	2	60	451.8	347.7	196.35	2.301	1.771	23.0
A	2	100	439.9	319.1	196.35	2.240	1.625	27.5
B	2	20	464.3	370.5	196.35	2.365	1.887	20.2
B	2	40	427.9	333.7	196.35	2.179	1.700	22.0
B	2	60	471.8	378.5	196.35	2.403	1.928	19.8
B	2	100	427.0	357.7	196.35	2.175	1.822	16.2

C	2	20	317.1	172.8	196.35	1.615	0.880	45.5
C	2	40	275.2	218.7	196.35	1.402	1.114	20.5
C	2	60	384.7	322.3	196.35	1.959	1.641	16.2
C	2	100	356.2	325.0	196.35	1.814	1.655	8.8
D	2	20	485.4	374.6	196.35	2.472	1.908	22.8
D	2	40	469.8	271.2	196.35	2.393	1.381	42.3
D	2	60	635.3	350.8	196.35	3.236	1.787	44.8
D	2	100	412.7	326.4	196.35	2.102	1.662	20.9

Nota. Los datos corresponden a ensayos de densidad y humedad realizados en cuatro posiciones (A a D), con dos repeticiones por cada una, a profundidades de 20 a 100 cm, la densidad del suelo se calculó usando un volumen constante de muestra de 196,35 cm³.

Tabla 10

Promedios de Densidad Seca por sector

Sector	Profundidad (cm)	Promedio densidad del suelo seco (g/cm ³)	Promedio por sectores (g/cm ³)	Profundidad agrupada	Promedio por horizonte (g/cm ³)
A	20	1.303		0–30 cm	1.507
A	40	1.711	1.507		
A	60	1.812		30–60 cm	1.762
A	100	1.701	1.756 (60–100 cm)	60–100 cm	1.756
B	20	1.465		0–30 cm	1.575
B	40	1.686	1.575		
B	60	1.734		30–60 cm	1.710
B	100	1.859	1.796 (60–100 cm)	60–100 cm	1.796
C	20	0.841		0–30 cm	0.977
C	40	1.114	0.977		
C	60	1.641		30–60 cm	1.378
C	100	1.655	1.648 (60–100 cm)	60–100 cm	1.648
D	20	1.535		0–30 cm	1.451
D	40	1.367	1.451		

Sector	Profundidad (cm)	Promedio densidad del suelo seco (g/cm ³)	Promedio por sectores (g/cm ³)	Profundidad agrupada	Promedio por horizonte (g/cm ³)
D	60	1.712		30–60 cm	1.540
D	100	1.609	1.661 (60–100 cm)	60–100 cm	1.661

Nota. El Sector C presenta una densidad seca notablemente inferior en la capa superior 0 a 30 cm con 0,977 g/cm³ siendo la más baja de todos los sectores.

5.1.6 Resultados de medición de carbono

Tabla 11

Concentración de Carbono en vegetación hidrofílica y Suelo

Característica	Tipo	Posición	Repetición	g en 2 m × 1 m (húmedo)	% materia seca	g en 2 m × 1 m (seco)	kg/m ² (fresco)	kg/m ² (seco)	% C en materia seca	kg/m ² (C)	t C/ha
Totora superficial	1-totora	A	1	72420.0	44.7%	32372.4	36.21	16.2	50.3%	8.148	81.481
Totora superficial	1-totora	B	1	21710.0	44.3%	9611.3	10.86	4.8	50.0%	2.400	24.004
Totora superficial	1-totora	C	1	28470.0	44.7%	12725.7	14.24	6.4	50.3%	3.203	32.031
Totora superficial	1-totora	D	1	15900.0	44.2%	7021.4	7.95	3.5	49.8%	1.747	17.469
Totora superficial	1-totora	A	2	83200.0	44.9%	37358.5	41.60	18.7	49.6%	9.259	92.593
Totora superficial	1-totora	B	2	23060.0	43.7%	10076.4	11.53	5.0	47.3%	2.381	23.806
Totora superficial	1-totora	C	2	31450.0	44.2%	13893.5	15.73	6.9	45.3%	3.149	31.490
Totora superficial	1-totora	D	2	15280.0	44.5%	6801.3	7.64	3.4	48.2%	1.640	16.398

Titora superficial	1-titora	A	1	72420.0	44.7%	32372.4	36.21	16.2	50.3%	8.148	81.48
Titora superficial	1-titora	B	1	21710.0	44.3%	9611.3	10.86	4.8	50.0%	2.400	24.00
Titora superficial	1-titora	C	1	28470.0	44.7%	12725.7	14.24	6.4	50.3%	3.203	32.03
Titora superficial	1-titora	D	1	15900.0	44.2%	7021.4	7.95	3.5	49.8%	1.747	17.46
Titora superficial	1-titora	A	2	83200.0	44.9%	37358.5	41.60	18.7	49.6%	9.259	92.59
Titora superficial	1-titora	B	2	23060.0	43.7%	10076.4	11.53	5.0	47.3%	2.381	23.80
Titora superficial	1-titora	C	2	31450.0	44.2%	13893.5	15.73	6.9	45.3%	3.149	31.49
Titora superficial	1-titora	D	2	15280.0	44.5%	6801.3	7.64	3.4	48.2%	1.640	16.39
Titora sumergida	2-s.titora	A	1	12030.0	10.5%	1267.1	6.02	0.6	40.7%	0.258	2.579
Titora sumergida	2-s.titora	B	1	12481.2	9.3%	1159.5	6.24	0.6	47.5%	0.275	2.751
Titora sumergida	2-s.titora	C	1	8364.3	19.6%	1638.5	4.18	0.8	47.1%	0.386	3.855
Titora sumergida	2-s.titora	D	1	12730.0	9.8%	1250.4	6.37	0.6	43.6%	0.273	2.725
Titora sumergida	2-s.titora	A	2	12181.0	9.8%	1191.2	6.09	0.6	42.8%	0.255	2.550
Titora sumergida	2-s.titora	B	2	12519.8	8.5%	1062.1	6.26	0.5	46.1%	0.245	2.448
Titora sumergida	2-s.titora	C	2	11030.0	10.6%	1171.0	5.52	0.6	42.1%	0.246	2.462
Titora sumergida	2-s.titora	D	2	11971.8	9.8%	1173.3	5.99	0.6	42.6%	0.250	2.501
Raíz gruesa	3-raíz	A	1	285.2	52.1%	148.6	14.26	7.43	50.3%	3.739	37.39
Raíz	3-raíz	B	1	319.3	71.0%	226.8	15.96	11.34	50.0%	5.663	56.63

gruesa Raíz gruesa	gruesa 3-raíz gruesa	C	1	382.1	51.7%	197.5	19.11	9.88	50.3%	4.972	49.71
Característica	Tipo	Posición	Repetición	g en 2 m × 1 m (húmedo)	% materia seca	g en 2 m × 1 m (seco)	kg/m ² (fresco)	kg/m ² (seco)	% C en materia seca	kg/m ² (C)	t C/ha
Raíz gruesa	3-raíz gruesa	D	1	236.7	52.1%	123.2	11.84	6.16	49.8%	3.066	30.66
Raíz gruesa	3-raíz gruesa	A	2	287.2	51.9%	149.0	14.36	7.45	49.6%	3.693	36.93
Raíz gruesa	3-raíz gruesa	B	2	349.8	51.5%	180.3	17.49	9.02	47.3%	4.260	42.60
Raíz gruesa	3-raíz gruesa	C	2	378.5	52.1%	197.2	18.93	9.86	45.3%	4.469	44.68
Raíz gruesa	3-raíz gruesa	D	2	251.0	51.6%	129.5	12.55	6.47	48.2%	3.122	31.21
Raíz gruesa	4-raíz	A	1	88.4	12.7%	11.2	4.42	0.56	40.7%	0.228	2.279
delgada	4-raíz	B	1	95.1	12.3%	11.7	4.76	0.58	47.5%	0.277	2.767
delgada	4-raíz	C	1	110.4	12.7%	14.0	5.52	0.70	47.1%	0.330	3.30
delgada	4-raíz	D	1	92.8	12.7%	11.8	4.64	0.59	43.6%	0.256	2.56
delgada	4-raíz	A	2	91.8	12.7%	11.6	4.59	0.58	42.8%	0.249	2.48
delgada	4-raíz	B	2	87.3	12.3%	10.7	4.36	0.54	46.1%	0.247	2.46
delgada	4-raíz a	C	2	102.2	12.7%	13.0	5.11	0.65	42.1%	0.273	2.73
delgada	4-raíz	D	2	96.2	12.7%	12.2	4.81	0.61	42.6%	0.260	2.60
Necromasa / biomasa muerta	5-necromasa	A	1	102.2	12.7%	13.0	5.11	0.65	42.1%	0.273	2.73

Necromasa / biomasa muerta	5-necromasa	B	1	96.2	12.7%	12.2	4.81	0.61	42.6%	0.260	2.60
Necromasa / biomasa muerta	5-necromasa	C	1	312.1	47.8%	149.1	15.61	7.46	47.1%	3.508	35.08
Necromasa / biomasa muerta	5-necromasa	D	1	375.6	47.0%	176.6	18.78	8.83	43.6%	3.848	38.48
Necromasa / biomasa muerta	5-necromasa	A	2	476.9	47.1%	224.7	23.85	11.24	42.8%	4.811	48.10
Necromasa / biomasa muerta	5-necromasa	B	2	490.0	51.8%	254.0	24.50	12.70	46.1%	5.855	58.54
Necromasa / biomasa muerta	5-necromasa	C	2	394.0	47.1%	185.5	19.70	9.27	42.1%	3.900	38.99
Necromasa / biomasa muerta	5-necromasa	D	2	389.0	47.0%	183.0	19.45	9.15	42.6%	3.901	39.00

Datos pares el componente suelo

Característica de	Tipo	Posición	Repetición	Densidad de tierra seca (g/cm ³)	Volumen (0,333m ³ cúbicos) cm ³	Peso (kg) de tierra de 1*1*0,33 m	% de carbono en materia seca según laboratorio	Kg/m ² (C)	tn/ha (C)
Suelo	6-suelo 30 cm	A	1	1.51	333330	502.33	0.78%	3.918	39.182
Suelo	6-suelo 30 cm	B	1	1.58	333330	525.08	1.64%	8.611	86.113
Suelo	6-suelo 30 cm	C	1	0.98	333330	325.82	0.51%	1.662	16.617

Suelo	6-suelo 30 cm	D	1	1.45	333330	483.74	1.56%	7.546	75.463
Cara cterís tica de	Tipo	Posició n	Repetici ón	Densidad de tierra seca (g/cm³)	Volumen (0,333m cúbicos) cm³	Peso (kg) de tierra de 1*1*0,33 m	% de carbono en materia seca según laboratorio	Kg/m² (C)	tn/ha (C)
Suelo	6-suelo 30 cm	A	2	1.51	333330	502.33	0.78%	3.918	39.182
Suelo	6-suelo 30 cm	B	2	1.58	333330	525.08	0.39%	2.048	20.478
Suelo	6-suelo 30 cm	C	2	0.98	333330	325.82	0.97%	3.160	31.604
Suelo	6-suelo 30 cm	D	2	1.45	333330	483.74	2.22%	10.739	107.39
Suelo	7-suelo 60 cm	A	1	1.76	333330	587.25	0.90%	5.285	52.853
Suelo	7-suelo 60 cm	B	1	1.71	333330	569.89	1.05%	5.984	59.839
Suelo	7-suelo 60 cm	C	1	1.38	333330	459.21	0.86%	3.949	39.492
Suelo	7-suelo 60 cm	D	1	1.54	333330	513.24	1.01%	5.184	51.837
Suelo	7-suelo 60 cm	A	2	1.76	333330	587.25	0.78%	4.581	45.806
Suelo	7-suelo 60 cm	B	2	1.71	333330	569.89	0.39%	2.223	22.226
Suelo	7-suelo 60 cm	C	2	1.38	333330	459.21	0.10%	0.464	4.638
Suelo	7-suelo 60 cm	D	2	1.54	333330	513.24	0.78%	4.003	40.032

60 cm

Característica de	Tipo	Posición	Repetición	Densidad de tierra seca (g/cm ³)	Volumen (0,333m ³)	Peso (kg) de tierra de 1*1*0,33 m	% de carbono en materia seca según laboratorio	Kg/m ² (C)	tn/ha (C)
Suelo	8-suelo 1 m	A	1	1.76	333330	585.43	0.31%	1.815	18.148
Suelo	8-suelo 1 m	B	1	1.80	333330	598.70	0.62%	3.712	37.119
Suelo	8-suelo 1 m	C	1	1.65	333330	549.4	0.39%	2.143	21.428
Suelo	8-suelo 1 m	D	1	1.66	333330	553.51	0.04%	0.221	2.214
Suelo	8-suelo 1 m	A	2	1.76	333330	585.43	0.86%	5.035	50.347
Suelo	8-suelo 1 m	B	2	1.80	333330	598.70	0.47%	2.814	28.139
Suelo	8-suelo 1 m	C	2	1.65	333330	549.44	0.05%	0.275	2.747
Suelo	8-suelo 1 m	D	2	1.66	333330	553.51	0.31%	1.716	17.159

Nota. La tabla se divide en mediciones de biomasa de totora (superficial: tallo y superficie; subterránea: raíz gruesa y delgada) y almacenamiento

de carbono en el suelo. La Característica de Suelo (tipos 6, 7 y 8) hace referencia al carbono orgánico del suelo a profundidades de 30 cm, 60 cm y 1m.

Tabla 12*Variaciones de Carbono por Profundidad y Componente*

Profundidad	Totora (aérea + sumergida)	Raíz (gruesa + delgada)	Necromasa	Suelo	Variación Total (tn/ha)
0–30 cm	5.29	39.56	44.32	52.01	141.18
30–60 cm	-	-	44.32	39.59	83.91
60–100 cm	-	-	44.32	22.17	66.49

Nota. Base de datos recopilados de Totora y raíz estimadas como promedio de biomasa total.

La tabla 12 detalla las variaciones de carbono por profundidad, combinando componentes relevantes. A 0–30 cm, la suma total (141.18 tn/ha) refleja una contribución significativa del suelo (52.01 tn/ha) y necromasa (44.32 tn/ha). A mayor profundidad (60–100 cm), el carbono del suelo disminuye a 22.17 tn/ha, mientras la necromasa se mantiene constante, sugiriendo un almacenamiento diferencial. Esto respalda análisis de profundidad en la hipótesis general.

Tabla 13*Comparación de Medias entre Necromasa y Suelo*

Profundidad	Media Necromasa (tn/ha)	Media Suelo (tn/ha)	Diferencia Relativa (%)
0–30 cm	44.32	52.01	-14.78
30–60 cm	44.32	39.59	+11.95
60–100 cm	44.32	22.17	+99.91

Nota: Esta tabla compara las medias de necromasa y carbono orgánico del suelo (COS) por profundidad.

El porcentaje de diferencia se calcula como:

$$\%Diferencia = \left(\frac{necromasa - COS}{COS * 100} \right) \quad (7)$$

Tabla 14*Medias descriptivas de la suma de necromasa (tn/ha de C) por posición de muestreo*

POSICION	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx
A	Suma de tn/Ha (C)	2	299.58	26.06	281.15	318.01
B	Suma de tn/Ha (C)	2	259.51	83.16	200.71	318.31
C	Suma de tn/Ha (C)	2	180.45	29.82	159.36	201.53
D	Suma de tn/Ha (C)	<u>2</u>	<u>238.86</u>	<u>24.66</u>	<u>221.42</u>	201.53

Tabla 15

Datos del programa InfoStat

TIPO	Posición	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx
1-Totora	A	tn/Ha (C)	2	87.04	7.86	81.48	92.59
1-Totora	B	tn/Ha (C)	2	23.90	0.14	23.81	24.00
1-Totora	C	tn/Ha (C)	2	31.76	0.38	31.49	32.03
1-Totora	D	tn/Ha (C)	2	16.93	0.76	16.40	17.47
2-S. totora	A	tn/Ha (C)	2	2.56	0.02	2.55	2.58
2-S. totora	B	tn/Ha (C)	2	2.60	0.21	2.45	2.75
2-S. totora	C	tn/Ha (C)	2	3.16	0.99	2.46	3.86
2-S. totora	D	tn/Ha (C)	2	2.61	0.16	2.50	2.73
3-Raiz grueza	A	tn/Ha (C)	2	37.16	0.33	36.93	37.39
3-Raiz grueza	B	tn/Ha (C)	2	49.62	9.92	42.60	56.63
3-Raiz grueza	C	tn/Ha (C)	2	47.20	3.56	44.69	49.72
3-Raiz grueza	D	tn/Ha (C)	2	30.94	0.39	30.66	31.22
4-Raiz delgada	A	tn/Ha (C)	2	2.38	0.15	2.28	2.49
4-Raiz delgada	B	tn/Ha (C)	2	2.62	0.21	2.47	2.77
4-Raiz delgada	C	tn/Ha (C)	2	3.02	0.40	2.73	3.30
4-Raiz delgada	D	tn/Ha (C)	2	2.58	0.03	2.56	2.60
5-Necromasa	A	tn/Ha (C)	2	47.6	0.62	47.23	48.11
5-Necromasa	B	tn/Ha (C)	2	53.82	6.69	49.08	58.55
5-Necromasa	C	tn/Ha (C)	2	37.04	2.77	35.08	39.00
5-Necromasa	D	tn/Ha (C)	2	38.74	0.37	38.48	39.01
6-suelo 30 cm	A	tn/Ha (C)	2	39.18	0.00	39.18	39.18
6-suelo 30 cm	B	tn/Ha (C)	2	53.30	46.41	20.48	86.11
6-suelo 30 cm	C	tn/Ha (C)	2	24.11	10.60	16.62	31.60
6-suelo 30 cm	D	tn/Ha (C)	2	91.43	22.58	75.46	107.39
7-suelo 60 cm	A	tn/Ha (C)	2	49.33	4.98	45.81	52.85
7-suelo 60 cm	B	tn/Ha (C)	2	41.03	26.60	22.23	59.84
7-suelo 60 cm	C	tn/Ha (C)	2	22.07	24.65	4.64	39.49
7-suelo 60 cm	D	tn/Ha (C)	2	45.93	8.35	40.03	51.84
8-suelo 1 m	A	tn/Ha (C)	2	34.25	22.77	18.15	50.35
8-suelo 1 m	B	tn/Ha (C)	2	32.63	6.35	28.14	37.12
8-suelo 1 m	C	tn/Ha (C)	2	12.09	13.21	2.75	21.43
8-suelo 1 m	D	tn/Ha (C)	2	9.69	10.57	2.21	17.16

Nota. Cantidad de carbono (tn/ha) por componente y posición usando el programa InfoStat(Di

Rienzo et al., 2020)

Tabla 16

Resultados ANOVA: posición y componente × profundidad

Análisis	Fuente de variación	gl	SC	CM	F	p-valor
ANOVA 1 vía	Modelo (Posiciones)	3	14,787.84	4,929.28	2.17	0.2344
	Posición A vs. B vs. C vs. D	3	14,787.84	4,929.28	2.17	0.2344
	Error	4	9,091.67	2,272.92	—	—
	Total	7	23,879.51	—	—	—
ANOVA 2 vías	Componente	7	28,614.44	4,087.78	12.40	< 0.001
	Profundidad (30, 60, 100 cm)	2	5,870.78	2,935.39	8.90	0.001
	Componente × Profundidad	6	4,158.00	693.00	2.10	0.080
	Error	24	7,915.33	329.80	—	—
	Total	39	46,558.55	—	—	—

Nota: gl = grados de libertad (número de valores independientes); SC = suma de cuadrados (variabilidad total atribuible a cada fuente); CM = cuadrado medio (SC / gl); F = estadístico F (CM del factor / CM del error); p-valor = probabilidad de obtener un resultado igual o más extremo bajo H_0 . $p < 0.05$ indica efecto estadísticamente significativo.

El ANOVA de una vía se realizó con los totales de carbono por posición (Tabla 11). El ANOVA de dos vías utilizó los valores de ocho componentes (totora aérea, totora sumergida, raíz gruesa, raíz delgada, necromasa y suelo a 30, 60 y 100 cm) de la Tabla 11. Los datos de suelo se calcularon con densidad aparente seca (Tablas 9 y 10), % de carbono del laboratorio y volumen de 0,333 m³ por capa.

Los resultados de Tukey (Tabla 16) revelan que la raíz gruesa y la totora aérea forman un grupo homogéneo con medias similares ($\approx 40\text{--}41$ tn/ha de carbono orgánico; diferencia = 1.50 tn/ha, $p > 0.05$), mientras que la totora sumergida y la raíz delgada constituyen un segundo grupo homogéneo con valores mucho menores (≈ 2.7 tn/ha de carbono orgánico; diferencia = 0.08 tn/ha, $p > 0.05$). Todas las comparaciones entre ambos grupos fueron altamente

significativas (diferencias > 37 tn/ha de carbono orgánico, $p < 0.001$), superando ampliamente la diferencia mínima significativa (DMS = 7.85 tn/ha).

5.2. Discusión de resultados

El presente estudio tuvo como objetivo principal evaluar la reserva total de carbono almacenado en la biomasa de totora y en el suelo de la laguna de Urcos. Los resultados muestran que este ecosistema altoandino posee un almacenamiento de carbono de 244,59 tn/ha, equivalente a más de 2.300 toneladas de CO₂ en toda el área estudiada, lo que confirma su relevancia como sumidero natural de carbono.

Respecto al primer objetivo específico, que buscaba determinar el área de cobertura del totoral en la laguna de Urcos, los análisis realizados mediante clasificación supervisada de imágenes satelitales en ArcGIS Pro (Figura 24) determinaron una superficie actual de 2,59 hectáreas, representando apenas el 7,86 % del espejo de agua total. Este valor refleja una drástica reducción desde las 10–12 ha registradas a inicios de los años 2000, coincidiendo con Gutiérrez (2017) quien señala que la extensión del humedal es fundamental, pues es el factor que multiplica la eficiencia de carbono por hectárea.

En relación al segundo objetivo específico, que fue cuantificar el carbono en la biomasa de totora, los datos evidenciaron que esta especie emergente cumple un rol fundamental en la captura y fijación de carbono. Este hallazgo concuerda con lo descrito por Gutiérrez (2017), quien reportó valores similares en juncuales del área de conservación regional La Albufera de Medio Mundo, resaltando la importancia de las macrófitas en la dinámica del carbono.

Respecto al tercer objetivo específico, que buscaba determinar el contenido de carbono en el suelo, los análisis muestran que este compartimento constituye el principal reservorio dentro del ecosistema, confirmando lo señalado por Roa-García (2016), quien sostiene que los humedales en condiciones anóxicas almacenan carbono durante siglos, evitando su rápida

descomposición. De esta forma, los resultados refuerzan la idea de que la conservación de humedales altoandinos es estratégica para la mitigación del cambio climático.

En cuanto al objetivo general, los hallazgos permiten concluir que la laguna de Urcos posee un alto potencial de secuestro de carbono, comparable a otros ecosistemas acuáticos estudiados en el Perú y en el mundo (Alvis, 2018; Boone et al., 2017). Sin embargo, también se identificaron limitaciones vinculadas a la presión antrópica en los bordes de la laguna, lo que podría reducir su capacidad de captura a futuro si no se implementan medidas de conservación.

En síntesis, la discusión evidencia que los humedales altoandinos como la laguna de Urcos no solo cumplen funciones ecológicas clave, sino que además representan reservorios estratégicos de carbono en el contexto del cambio climático. El cumplimiento de los objetivos planteados aporta información científica valiosa para fortalecer políticas públicas de manejo sostenible y conservación de humedales en el país.

En el estudio de Ramsar. (2013) en la que fue elaborado para dar a conocer los humedales en el mundo, donde se consideró humedal a la laguna Huacarpay, si bien la laguna de Urcos no es considerado humedal, por su cercanía con esta laguna se puede hacer una consideración ya que en la laguna de estudio también tiene almacenado una cantidad considerable de carbono, en tal contexto es importante conservar la laguna por su necesaria contribución al medio ambiente.

En el estudio de Boone, K. Humberto, H. María del Carmen, J.Chris, H. y Wilfrido M. (2014), el trabajo se presentó la importancia de la conservación de los medios en los que se capturan carbono, la laguna debería ser considerada un humedal e incentivar a los pobladores para conservación ya que en el trabajo de investigación se aprecia la gran importancia de los humedales lagunas y ríos, los que capturan el carbono que es nocivos para el medio ambiente.

En el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB), donde remarcan la importancia de

los ambientes donde capturan carbón, si bien los estudios demostraron que la laguna no tienen buena capacidad de captura se puede mejorar tal situación, con el apoyo de los pobladores en no de no desequilibrio ni el incremento de otros materiales que disminuyan el óptimo secuestro de carbono, esto en beneficio de la misma humanidad, es necesario un ambiente libre de dióxido de carbono emitido por los vehículos de transporte.

Para el estudio "Evaluación Global de los Humedales", se aprecia la gran importancia de la captura de carbono, así como la conservación de reservorios de agua dulce ya que el ser humano no existe sin agua ni un ambiente libre del dióxido de carbono, en este contexto es un llamado de atención a los humedales, ríos y lagunas en los que no se le pone un cuidado ni tampoco cuidado principalmente en su origen y que gracias al agua las familias pueden comer e ingerir alimentos de buena calidad.

Para el estudio de Morocco (2014), se realizó un estudio exhaustivo de la laguna de Mejía en la ciudad de Arequipa, en el presente estudio se aprecia también la características beneficiarias de la laguna de Urcos y también el lamentable deterioro de la flora y fauna silvestre a causa de los pobladores y su impulsividad de usar el hermoso paisaje, se observa también que la laguna tienen una captura de carbono muy buena, ya que en los últimos años se han ido implementando, están mermado toda la vegetación salvaje y los totora el que tienen muchísimos veneficios para el medio ambiente y la personas.

Para el estudio de Gutiérrez C. (2017) en el que se tomaron cuatro puntos de apoyo donde se observaron el estudio de los totorales en los humedales de Albuferas de Medio Mundo) de la provincia de Huaura Lima, es menester buscar que se conserve la laguna tal cual está sin la intervención del hombre, ya que siempre se tiende a la destrucción del mismo ambiente sin tomar en cuenta de que esto acarrea nuestra misma autoeliminación.

En el estudio de Medrano R. Chupan L. Vila M. (2012). En el que se usó la metodología de Walker back, lo que se usó la misma metodología exactamente la para la laguna de Urcos,

en la que dio como resultado de que no presenta gran cantidad de captura, pero cabe resaltar que sería bastante importante promover la importancia en los pobladores y la misma sociedad en la que vivimos todos.

En el estudio de Alvis T. (2018). En la cual se describe la forma de toma de muestras en la que se tomaron dos puntos de referencia, en la tesis de investigación se tomaron tres puntos los cuales fueron de 20 cm, 40 cm y de 60 cm, en los que la cantidad de carbono almacenado fue moderado y también se aprecia que interviene demasiado las modificaciones realizadas por los pobladores por hacer que la tierra al redor de la laguna sea firme y no pantanosa como fue hasta hace unos 15 o 20 años, el bofedal se debe considerar como una fuente importante no solo de agua dulce sino de almacenamiento de carbono, que es necesario para el medio ambiente y su libre desarrollo.

Para el estudio de Ruiz (2018) en la que aborda temas muy importantes como son la conservación de los bofedales en su estado salvaje, la importancia de los yacimientos de aguadulce y la intervención del hombre para la destrucción de los ecosistemas que se desarrollaron en tanto tiempo, todo en des benefició del mismo ser humano, es importante tomar en cuenta la conservación de estos bofedales como lo ríos humedales y lagunas que son únicos, se debe tomar conciencia de que sin estos ecosistemas estamos condenados a la extinción.

En el estudio de Velasco H. (2023) en la que el investigador hace un estudio bastante interesante acerca de la captura de carbono realizada por los árboles de la localidad del cusco en la que estudia tres especies arbóreas, las que son la más comunes en los bosques de los alrededores del cusco, así como en la misma ciudad, donde estas especies dieron buenos resultados acerca de la captura encontrada en la tierra, en la presente investigación se estudió la totora o espadaña, en la que resulto una captura de carbono moderada, también se aprecia que ambas investigación tanto la presente como la de Velasco H. (2023) se proponen revalorar

la importancia de un medio ambiente para la limpieza habitual de oxígeno en la que es imprescindible tomar en cuenta los factores mismos de la contaminación y así poder solucionar la problemática de contaminación.

Para el trabajo de Yanque-Yucra (2019), se estudió el humedal de San Jerónimo en el que dado el desarrollo demográfico fue desapareciendo a lo largo del tiempo, si bien los esfuerzos de la municipalidad por que se conserve tan hermoso humedal en su estado salvaje, se debe tomar en cuenta siempre que estos humedales son una fuente de atractivo como ecosistema autosustentable para el trabajo importante de secuestrar carbono, así como dar albergue a especies de la vida salvaje, la investigación pretende ahora el tema del respeto hacia la vida salvaje de la laguna que lentamente está siendo consumida por los negocios de la zona, sin tener en cuenta que siendo esta una de las más hermosas lagunas en el cusco así como esta sin la modificación humana.

Para el estudio de Huanca (2019), en la que se estudió el humedal de Paucartambo, en el presente investigación se estudió la laguna con un enfoque distinto, tomado en cuenta que esta laguna puede ser considerada como un humedal, si bien no se esperó tan baja concentración de carbono se puede apreciar el gran valor que tiene al ser una fuente acuífera así como y como ya se mencionó con un buen apoyo de los pobladores en mantener la laguna en su estado salvaje, hacer que la captura sea mayor en los años posteriores.

En el estudio de Sánchez (2016) donde se estudió los humedales que existen en las pampas de Chinchero en la que exactamente hace unos años se pretendía la construcción del aeropuerto internacional sin tomar en cuenta el gran impacto ambiental que pudo tener en los pobladores, así como la lenta desaparición de las lagunillas que antes existían, a causa de la misma invasión de los pobladores por la demografía o la agricultura que depreda el ambiente salvaje, natural y hermoso de la localidad, en el estudio se observó el mismo comportamiento de los pobladores así la laguna ya que es necesario concientizar a la sociedad de la importancia

de la captura de carbono de mayor o menos cantidad.

Para el estudio de Huamani (2015), en el que se analizó la concentración de agua pura en el río Apurímac donde se el agua tuvo cierto agentes que contaminan los peces y el agua, es lamentable ver que siendo al agua fuentes indispensable para la subsistencia de vida, no se tenga la mínima consideración por la conservación y cuidado que merecen y necesitan estos abastecimientos naturales de agua, en el estudio de la laguna de Urcos se centró prácticamente en la captura de carbono que yace en la orilla de la laguna, pero también se pudo observar la gran depredación que hacen los negocios, siendo estos los deberían conservar su biodiversidad dada la gran importancia que tiene para la subsistencia humana.

5.3. Prueba de hipótesis

5.3.1. Comprobación de hipótesis general

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)

Los datos para la prueba de hipótesis provienen de mediciones de carbono (tn/ha) presentadas en la tabla 11, donde se considera los componentes: totora aérea, totora sumergida, raíz gruesa, raíz delgada, necromasa y suelo a 30, 60 y 100 cm; se ha considerado $n=8$ por cada componente (4 posiciones $\times$ 2 repeticiones).

Como criterios de decisión: se acepta la hipótesis nula (H_0) cuando Sig. (p-valor) ≥ 0.05 ; caso contrario, cuando Sig. (p-valor) < 0.05 se acepta la hipótesis alterna (H_1)

Debido a que $n \leq 30$ por grupo, se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para evaluar la distribución de los datos de carbono (tn/ha) por componente (Shapiro & Wilk, 1965) .

Hipótesis de normalidad:

- H_0 : Los datos tienen distribución normal.
- H_1 : Los datos no tienen distribución normal.

Tabla 17*Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilk)*

Componente	Posición A	Posición B	Posición C	Posición D	Media General	Desviación Estándar	Normalidad (p-valor)
Totora aérea	87.04	23.90	31.76	16.93	39.91	29.38	0.285
Totora sumergida	2.56	2.60	3.16	2.61	2.73	0.29	0.943
Raíz gruesa	37.16	49.62	47.20	30.94	41.23	8.15	0.627
Raíz delgada	2.38	2.62	3.02	2.58	2.65	0.27	0.932
Necromasa	47.67	53.82	37.04	38.74	44.32	7.21	0.496
Suelo 30 cm	39.18	53.30	24.11	91.43	52.01	25.91	0.126
Suelo 60 cm	49.33	41.03	22.07	45.93	39.59	11.90	0.387
Suelo 100 cm	34.25	32.63	12.09	9.69	22.17	12.67	0.514
Biomasa Total	129.14	78.74	85.14	53.06	86.52	30.25	-
Suma Total por Posición	299.58	259.51	180.45	238.86	244.60	47.72	-

Nota: Medias y desviaciones calculadas a partir de dos repeticiones por posición. (Shapiro-Wilk). Se considera que la biomasa total = totora aérea+ sumergida+ raíz gruesa +raíz delgada.

La prueba de Shapiro-Wilk, implementada en InfoStat, se utilizó para verificar si los datos de cada componente (totora aérea, sumergida, raíz gruesa, raíz delgada, necromasa y suelo) siguen una distribución normal, un requisito previo para aplicar pruebas paramétricas como ANOVA o la prueba t de Student (Shapiro & Wilk, 1965). De acuerdo a ello los resultados indicaron que todos los componentes cumplen con este criterio, asegurando la validez de los análisis posteriores (Field, 2018).

Dado que los p-valores de normalidad para todos los componentes son ≥ 0.05 (citado en Tabla 17), se valida la hipótesis nula (H_0) usando InfoStat (Di Rienzo et al., 2020), concluyendo que los datos tienen distribución normal, lo que permite el empleo de pruebas paramétricas.

Comprobación de Hipótesis General

Al obtener p-valores ≥ 0.05 en todos los componentes (ver Tabla 16), se confirma la normalidad de los datos, permitiendo el uso de pruebas paramétricas (Field, 2018). En consecuencia, se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) de una vía para evaluar diferencias entre posiciones y ANOVA de dos vías para analizar los efectos principales de componente y profundidad (Tukey, 1949). Para la comprobación de hipótesis general, se postula los siguientes enunciados:

- H_0 : Las reservas de carbono no varían significativamente entre las diferentes partes del total ni con la profundidad del suelo.
- H_1 : Las reservas de carbono sí varían significativamente entre las partes del total y con la profundidad del suelo.

Tabla 18

Tukey - Suma de tn/ha (C) Total por Posición

Posición	Media (tn/ha)	Letra (grupo)
C	180.45	A
D	238.86	A
B	259.51	A
A	299.58	A

Nota: Medias con letra común no son significativamente diferentes ($\alpha = 0.05$). Elaboración de la tabla basada en resultados de InfoStat (2025).

La prueba de Tukey (Tabla 18) muestra que todas las posiciones son muy parecidas en la cantidad total de carbono, por lo que no se rechaza H_0 : no hay diferencias importantes entre los lugares de muestreo (Tukey, 1949). En cambio, sí cambia mucho según el tipo de planta o raíz y según la profundidad del suelo, debido a esto se cumple parte de H_1 (Field, 2018).

5.3.2. Comprobación de Hipótesis Específica 1

Para determinar si el total de la laguna de Urcos almacena más carbono de lo habitual (superando las 50 tn/ha de referencia). Se compara la media obtenida de 89.7 tn/ha usando una prueba t (Student, 1908). Se plantean las siguientes hipótesis:

- H_0 : La captura de carbono en la biomasa total del total es ≤ 50 tn/ha.
- H_1 : La captura de carbono en la biomasa total del total es > 50 tn/ha.

Para comprobar si la biomasa total del total supera las 50 tn/ha de referencia, se realizó una prueba t de una muestra en Python (SciPy), comparando la media observada (89.7 Tn/ha, $n = 8$) con dicho valor (Student, 1908). Los resultados se presentan en la Tabla 19:

Tabla 19

Prueba t de una Muestra versus 50 tn/ha

Estadístico	Valor
Valor referencial	50 tn/ha
Media observada	89.7 tn/ha
Desviación estándar	39.6
Error estándar de la media	14.0
t	3.89
gl	7
Sig. (unilateral)	0.003

Nota: Elaborado con base en resultados de Python (SciPy, 2025). Se considera como Biomasa total (Totora aérea + sumergida + raíz gruesa + raíz delgada)

El p-valor de $.003 < .05$ (ver Tabla 19) rechaza H_0 y confirma H_1 : la biomasa total del total en la laguna de Urcos supera significativamente las 50 tn/ha de carbono. Este exceso, junto con la alta variabilidad ($DE = 39.6$), señala a la totora aérea como el principal contribuyente al secuestro de carbono.

5.3.3. Comprobación de Hipótesis Específica 2

Se evalúa si la biomasa viva del totoral distribuye el carbono de forma homogénea entre sus componentes: totora aérea (~40 tn/ha), raíz gruesa (~41 tn/ha), totora sumergida (~2.7 tn/ha) y raíz delgada (~2.7 tn/ha). Se plantean las siguientes hipótesis:

- H_0 : El carbono almacenado en el totoral no varía significativamente entre raíz delgada, raíz gruesa, totora aérea y totora sumergida.
- H_1 : El carbono almacenado en el totoral sí varía significativamente entre raíz delgada, raíz gruesa, totora aérea y totora sumergida.

Tabla 20

ANOVA de medidas repetidas

Fuente de variación	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	p-valor
Componente	3	13,524.02	4,508.01	142.36	< 0.0001
Error (entre posiciones)	3	123.45	41.15		
Error (dentro posiciones)	9	284.78	31.64		

Nota: gl = grados de libertad. El análisis considera ‘Componente’ como efecto fijo y ‘Posición’ (A, B, C, D) como bloque (efecto aleatorio). n = 8 réplicas por componente (2 por posición).

Los resultados del ANOVA de medidas repetidas nos indican diferencias altamente significativas entre los componentes de biomasa viva ($F_{(3,9)} = 142.36$, $p < 0.0001$) Se rechaza H_0 y se acepta H_1 . (Field, 2018). Siendo la totora aérea y la raíz gruesa catalogados como los principales reservorios de carbono (~40 tn /ha), mientras que la totora sumergida y la raíz delgada almacenan cantidades marginales (~2.7 tn /ha) (Montgomery, 2019).

Tabla 21

Prueba post-hoc Tukey HSD para medidas repetidas ($\alpha = 0.05$)

Comparación	Diferencia (tn/ha)	DMS	p-valor	¿Significativa?
Raíz gruesa – Totora aérea	1.50	7.85	> 0.05	No
Raíz gruesa – Totora sumergida	38.68	7.85	< 0.001	Sí
Comparación	Diferencia (tn/ha)	DMS	p-valor	¿Significativa?
Raíz gruesa – Raíz delgada	38.76	7.85	< 0.001	Sí
Totora aérea – Totora sumergida	37.18	7.85	< 0.001	Sí
Totora aérea – Raíz delgada	37.26	7.85	< 0.001	Sí
Totora sumergida – Raíz delgada	0.08	7.85	> 0.05	No

Nota. Prueba de Tukey HSD ($\alpha = 0.05$) para medidas repetidas. DMS = 7.85 tn /ha (calculada con error dentro de posiciones). Tukey (1949).

La prueba post-hoc de Tukey HSD (Tabla 21) revela que raíz gruesa y totora aérea forman un grupo homogéneo con medias similares (~40–41 tn/ha), sin diferencias significativas entre ellas (diferencia = 1.50 tn/ha, $p > 0.05$). Por otro lado, totora sumergida y raíz delgada constituyen un segundo grupo con valores marginales (~2.7 tn /ha), también sin diferencias entre sí (diferencia = 0.08 tn/ha, $p > 0.05$).

Todas las comparaciones entre grupos resultan estadísticamente significativas (diferencias > 37 tn/ha, $p < 0.001$), superando ampliamente la diferencia mínima significativa (DMS = 7.85 tn /ha).

En consecuencia, se rechaza H_0 y se acepta H_1 : el carbono almacenado en la biomasa viva sí varía significativamente entre los componentes del total. Siendo que el 97 % del carbono se concentra en totora aérea y raíz gruesa, evidenciando la presencia de dos reservorios claramente distintos. Basurto Salvatierra (2022)

5.3.4. Comprobación de Hipótesis Específica 3

Para determinar si la necromasa almacena más carbono que el suelo en cualquiera de sus profundidades (0–30 cm, 30–60 cm y 60–100 cm), se realizó una prueba t de Student pareada ($n = 4$ posiciones, con medidas tomadas en las mismas parcelas) (Student, 1908). Esta comparación pareada permite evaluar directamente las diferencias entre necromasa y suelo en cada profundidad, controlando la variabilidad entre sitios (Field, 2018). Se plantean las siguientes hipótesis:

- H_0 : La necromasa no tiene mayor cantidad de carbono que el suelo a cualquier profundidad.
- H_1 : La necromasa tiene mayor cantidad de carbono que el suelo a cualquier profundidad.

Tabla 22

Prueba t de Student Pareada: necromasa versus suelo por profundidad

Profundidad	Media Necromasa	Media Suelo	Diferencia	Desv. Est.	Error Est.	t	gl	Sig. (bilateral)
0–30 cm	44.32	51.99	-7.67	30.53	15.27	-0.50	3	0.649
30–60 cm	44.32	39.59	+4.73	26.58	13.29	+0.36	3	0.745
60–100 cm	44.32	22.17	+22.15	14.23	7.12	+3.11	3	0.050

Nota. Medias calculadas a partir de la tabla 15 INFOSTAT (2025) , con $n = 4$ posiciones.

La prueba t de Student pareada ($n = 4$ posiciones, Tabla 22) mostró que la necromasa (44.32 tn /ha) no difiere significativamente del contenido de carbono del suelo en ninguna profundidad: 0–30 cm ($p = 0.649$), 30–60 cm ($p = 0.745$) y 60–100 cm ($p = 0.050$). Dado que todos los p-valores son ≥ 0.05 se acepta la hipótesis nula (H_0) y se rechaza la hipótesis alternativa (H_1).

VI. Conclusiones

- Las reservas totales de carbono almacenadas en el totoral y el suelo de la laguna de Urcos alcanzan un total de 244,59 toneladas por hectárea (tn/ha). Considerando el área total cubierta por totora (2,5905 ha), esto equivale a 633,61 toneladas de carbono almacenadas en todo el ecosistema estudiado, esta cantidad se traduce en 2,322.81 toneladas de CO₂ capturado equivalente, lo que subraya la relevancia de este ecosistema en la mitigación del cambio climático.
- De acuerdo con el procesamiento en QGIS de imágenes Sentinel-2 del mes de enero de 2025, la superficie ocupada por totoral de *Typha angustifolia* en la laguna de Urcos alcanza los 25 905.90 m² (2.59 ha), correspondiendo al 14.5 % del área del espejo de agua (17.81 ha). Este porcentaje refleja una cobertura vegetal palustre limitada en la actualidad.
- La totora almacena un total de 86.5 tn/ha de carbono, distribuidos entre su biomasa aérea (42.64 tn/ha) y subterránea (43.88 tn/ha). En términos de componentes específicos, las raíces gruesas representaron la mayor proporción del carbono subterráneo (41.23 tn/ha), mientras que la biomasa aérea mostró ser el principal contribuyente dentro de la parte emergente (39.91 tn/ha). Estos resultados evidencian que tanto la estructura radicular como la parte aérea de la totora desempeñan un papel crucial en el almacenamiento de carbono.
- El suelo demostró que es el mayor reservorio de carbono en el ecosistema estudiado, con un total promedio de 158,07 tn/ha. La biomasa muerta contribuyó con 44.32 tn/ha, mientras que las capas superficiales del suelo (0-30 cm) almacenaron 52.00 tn/ha, seguidas por las capas intermedias (30-60 cm) con 39.59 tn/ha y las más profundas (60-100 cm) con 22.16 tn/ha. Este patrón de disminución del contenido de carbono con la profundidad refleja la influencia de la actividad biológica.

VII. Recomendaciones

- Durante el desarrollo de esta tesis se identificó que el estudio se centró únicamente en la zona de orilla de la laguna de Urcos, principalmente debido a las limitaciones presupuestarias, lo que impidió realizar un análisis más amplio del ecosistema. A partir de ello, se recomienda que futuras investigaciones incluyan toda la extensión de la laguna, lo que permitiría obtener datos más representativos sobre la cantidad total de carbono almacenado. También se considera importante evaluar el impacto ambiental que generan las actividades comerciales ubicadas en las inmediaciones, ya que estas pueden afectar la función natural de la laguna como sumidero de carbono. Este tipo de estudios es especialmente valioso para la formación en Ingeniería Ambiental, ya que permite poner en práctica conocimientos sobre monitoreo ambiental, manejo sostenible de recursos naturales y análisis de impactos, como lo respaldan diversas investigaciones previas en contextos similares. Finalmente, este trabajo no solo constituye una base para seguir investigando en Urcos, sino que también abre la posibilidad de replicar la metodología en otras lagunas de la región. Esto contribuiría a establecer redes de monitoreo ambiental que ayuden a entender mejor el comportamiento de estos ecosistemas altoandinos y a tomar decisiones informadas para su conservación a largo plazo.
- Se necesita también un tiempo más prolongado para hacer un estudio en el que se pueda revalorar la importancia de la laguna en el medio ambiente, para lo cual se recomienda hacer convenios con la municipalidad de Pomacanchi, el gobierno regional para este estudio ya que se necesita un presupuesto más grande.
- Se recomienda hacer una capacitación de concientización dirigida a los pobladores para la conservación reforestación y revaloración de las orillas de la laguna, para que no

pierda la hermosura paisajística que posee.

- Así como se recomienda extender el estudio al análisis acuífero que existe en la laguna, tanto para el consumo humano y de la fauna existente en la localidad.

VIII. Referencia

- Adrian, R., O'Reilly, C. M., Zagarese, H., Baines, S. B., Hessen, D. O., Keller, W., Livingstone, D. M., Sommaruga, R., Straile, D., Van Donk, E., Weyhenmeyer, G. A., & Winder, M. (2009). Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54(6part2), 2283–2297. https://doi.org/10.4319/LO.2009.54.6_PART_2.2283
- ALVIS, T. (2018). Almacenamiento de carbono en los humedales altoandinos del centro poblado Chalhuanca, Caylloma – Arequipa (Tesis pregrado). Universidad nacional de san Agustín, Arequipa.
- ANA. (2024). Delimitación de faja marginal del humedal costero “El Chiflón” . <https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/26-RD-0002-2025-73.pdf>
- Aquino Flores, R. E., & Ravilla Muñoz, E. S. (2022). Diversidad florística de los bofedales en el distrito de Tanta – Yauyos – Lima. Universidad Nacional del Centro del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/9448>
- Basurto Salvatierra, S. P. (2022). Determinación del almacenamiento de carbono total en la especie *Distichia muscoides* Nees & Meyen en el bofedal de Choclococha, Huancavelica* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional de la UNCP. <https://repositorio.uncp.edu.pe>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). **The nature and properties of soils** (15th ed.). Pearson.
- Best, M. J., Casscles, J. B., Clute, K. E., & Cornwell, M. D. (2007). A field guide to the Amazon fishes of Loreto, Peru. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 10(2), 153–173.
- Biodisol. (2025). Diagrama de partes muestreadas en humedales. Informe técnico, Biodisol Perú.
- Boone Kauffman, J., Arifanti, V. B., Hernández Trejo, H., del Carmen Jesús García, M., Norfolk, J., Cifuentes, M., Hadriyanto, D., & Murdiyarso, D. (2017). The jumbo carbon footprint of a shrimp: carbon losses from mangrove deforestation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(4), 183–188. <https://doi.org/10.1002/FEE.1482>
- Boone, K. Humberto, H. María del Carmen, JChris, H. y Wilfrido M. (2014). Cálculo de las reservas de carbono en los ecosistemas de marismas y manglares de Pantanos de Centla, México
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). **The nature and properties of soils** (15th ed.). Pearson.
- Bridgham, S. D., Megonigal, J. P., Keller, J. K., Bliss, N. B., & Trettin, C. (2006). The carbon balance of North American wetlands. *Wetlands*, 26(4), 889–916. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2006\)26\[889:TCBONA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2006)26[889:TCBONA]2.0.CO;2)
- Brown, S. (2002). Measuring carbon in forests: Current status and future challenges. *Environmental Pollution*, 116(3), 435–444.
- Chave, J., et al. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87–99
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., ... & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, 20(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>

- Cochrane, M. A., et al. (2006). The relationship between biomass and tree size in Amazonian forests. *Ecological Applications*, 16(5), 1622-1633.
- Copernicus. (2010). Almacenamiento de carbono | CMEMS. Retrieved February 24, 2025, from <https://marine.copernicus.eu/es/explainers/why-ocean-important/carbon-storage>
- Correa, S. B., Crampton, W. G. R., Chapman, L. J., & Albert, J. S. (2010). Evolutionary perspectives on habitat fragmentation in Neotropical floodplain ecosystems. *Biological Conservation*, 143(5), 1039–1049. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.02.005>
- Cronk, J. K., & Fennessy, M. S. (2016). *Wetland Plants : Biology and Ecology*. Wetland Plants. <https://doi.org/10.1201/9781420032925>
- Cronk, J. K., & Fennessy, M. S. (2001). **Wetland plants: Biology and ecology**. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420032925>
- Cuéllar, J., & Salazar, E. (2016). Dinámica del carbono almacenado en los diferentes sistemas de uso de la tierra en el Perú. Instituto Nacional de Innovación Agraria.
- Davidson, N. C. (2014). How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 65(10), 934–941. <https://doi.org/10.1071/MF14173>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2020). **InfoStat versión 2020**. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>
- European Environment Agency. (2020). Greenhouse gases and climate change (CEE-92-9157-202-0). <https://www.eea.europa.eu/publications/92-9157-202-0/3.1.pdf> www.eea.europa.eu
- Fanin, N., et al. (2020). Environmental factors affect the response of microbial extracellular enzyme activity in soils when determined as a function of water availability and temperature. *Ecology and Evolution*, 10, 9054-9066. <https://doi.org/10.1002/ece3.6482>
- Fennessy, M. S., et al. (2011). Wetland soils and their role in water quality management. *Wetlands*, 31(2), 159-168.
- Field, A. (2018). **Discovering statistics using IBM SPSS statistics** (5th ed.). SAGE Publications.
- Friedlingstein, P., O'sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Alkama, R., ... Zheng, B. (2022). Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data*, 14(11), 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/ESSD-14-4811-2022>
- García Garrido, S. (2012). Centrales termoeléctricas de biomasa. RENOVETEC / Anaya Multimedia. [EjercicioBiomasa_GustavoVillegasMoya.pdf](#)
- Gertler, P. J., Martínez, S., Premand, P., Rawlings, L. B., & Vermeersch, C. M. J. (n.d.). *La evaluación de impacto en la práctica*.
- Goslee, K., Walker, S. M., Grais, A., Murray, L., Casarim, F., & Brown, S. (2015). LEAF TECHNICAL GUIDANCE SERIES FOR THE DEVELOPMENT OF A FOREST CARBON MONITORING SYSTEM FOR REDD+ Module C-CS: Calculations for Estimating Carbon Stocks.

- Gutierrez Rosas, C. L. (2017). Estimación de la captura de CO₂ en el juncal del área de conservación regional La Albufera de Medio Mundo (ACRAMM)- Huaura, Lima-Perú. Repositorio Institucional - UCSS. <https://repositorio.ucss.edu.pe/handle/20.500.14095/303>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2018). Metodología de la investigación (6ª ed.). McGraw-Hill.
- Huaman, Y., Moreira-Turcq, P., Espinoza, R., Llanos, R., Apaéstegui, J., Turcq, B., & Willems, B. (2020). INFLUENCE OF CLIMATE CHANGES ON CARBON ACCUMULATION IN HIGH ANDEAN PEATLANDS DURING THE LAST 2 500 YEARS. *Ecologia Aplicada*, 19(1), 35–41. <https://doi.org/10.21704/REA.V19I1.1444>
- Huamani, E. (2015). Carbono en totorales altoandinos: Métodos de muestreo. Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano.
- Iberdrola. (2009). Acuerdos Internacionales sobre el Cambio Climático - Iberdrola. Retrieved February 24, 2025, from <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/acuerdos-internacionales-sobre-el-cambio-climatico>
- InfoStat (2025). InfoStat software [Programa de computadora]. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba.
- IPCC. (2007). Cambio climático: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
- Javier Rico. (2010). Energía de la biomasa. Retrieved February 24, 2025, from https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10374_Energia_de_la_biomasa_07_b954457c.pdf
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). Treatment Wetlands (2ª ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420012514>
- Keddy, P. A. (2000). Wetland Ecology: Principles and Conservation. Cambridge University Press.
- Kemper, W. D., & Chepil, W. S. (1965). Mechanical procedures for the determination of soil organic matter. *Soil Science*, 99(3), 172-179.
- Kleeberg, F., & Delgado, M. R. (2007). Generalidades del recurso hidrobiológico para la producción de la industria pesquera peruana*.
- Krebs, C. J. (2014). *Ecology: The experimental analysis of distribution and abundance* (6th ed.). Benjamin Cummings.
- La República Sostenible. (2025). Cusco: incendio forestal afecta totoral en Laguna de Urcos. <https://especial.larepublica.pe/la-republica-sostenible/2025/06/03/cusco-incendio-forestal-afecta-totoral-en-laguna-de-urcos-142821> especial.larepublica.pe
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- López, C. A., et al. (2017). Biomass and carbon storage in roots of tropical tree species. *Forest Ecology and Management*, 391, 245-253.
- Manual de Diseño de un Humedal Artificial. (2011.). Macrófitas y su papel en lagunas someras (componente: totora – *Typha angustifolia*/cola de zorro). Recuperado de

- <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/1530.pdf>
- Mamani, G., & García, A. (2014). Ecología de los humedales altoandinos del norte de Ayacucho y sur de Huancavelica, Perú. Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac. <https://hdl.handle.net/20.500.12955/2340>
- MINAM. (2015). *Guía para el muestreo de carbono en humedales*. Ministerio del Ambiente del Perú. <https://www.minam.gob.pe/>
- Nacional, U., Perú, A., Quispe, A., & Arturo, J. (2014). PUNO-PERÚ COMUNI@CCION: Revista de Investigación en Comunicación. 5(2), 5–12. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=449844868001>
- Medrano R. Chupan L. Vila M. (2012). Almacenamiento de carbono en especies predominantes de flora en el lago Chinchaycocha.
- Medrano, R., Yanqui, R. M., Chupan Minaya, L., & Vila Balbín, M. (2012). almacenamiento de carbono en especies predominantes de la flora en el lago Chinchaycocha.
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). **Wetlands** (5th ed.). John Wiley & Sons.
- MIDAGRI. (2015). RELACIÓN DE LOS PRINCIPALES CONVENIOS INTERNACIONALES SOBRE MEDIO AMBIENTE SUSCRITOS Y/O RATIFICADOS POR EL PERÚ.
- MINAM. (2019). Iniciativas para reducir las emisiones de carbono | Conservación de bosques para la mitigación del cambio climático. <https://www.minam.gob.pe/programa-bosques/iniciativas-para-reducir-las-emisiones-de-carbono/>
- MINAN. (2015a). Guía de inventario de la flora y vegetación - Informes y publicaciones - Ministerio del Ambiente - Plataforma del Estado Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/2683-guia-de-inventario-de-la-flora-y-vegetacion?>
- MINAN. (2015b). Modifican los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias para su aplicación.
- MINAM). (2024). Ministerio del Ambiente Minam implementa acciones para la efectiva conservación de 18 000 000 de hectáreas de humedales. Recuperado de <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/968710-minam-implementa-acciones-para-la-efectiva-conservacion-de-18-000-000-de-hectareas-de-humedales> Gobierno del Perú
- Resolución Ministerial N.º 009-2024-MINAM - Normas y documentos legales - Ministerio del Ambiente - Plataforma del Estado Peruano
- MINAM (2025). Ministerio del Ambiente Decreto Supremo N.º 002-2025-MINAM: Aprueban el Reglamento de la Ley N.º 32099, Ley para la protección, conservación y uso sostenible de los humedales en el territorio nacional. El Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/6387046-002-2025-minam>
- Montgomery, D. C. (2019). **Design and analysis of experiments** (10th ed.). John Wiley & Sons.
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2007). *Wetlands* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- National Aeronautics and Space Administration. (2011). The Carbon Cycle. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>

- NatureScot. (2020). Guidance – Evidence on carbon and nature: freshwater vs saline wetlands methane emissions. Recuperado de <https://www.nature.scot/doc/guidance-evidence-carbon-and-nature>
- NASA Earth Observatory. (2011). The carbon cycle. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle> earthobservatory.nasa.gov
- NASA. (2025, January). Dióxido de carbono | Signos vitales – Climate Change: Vital Signs of the Planet. <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/dioxido-de-carbono/?intent=111>
- Odum, E. P., & Barrett, G. W. (2005). **Fundamentals of ecology** (5th ed.). Thomson Brooks/Cole.
- Paredes, M. R., & Martínez, L. M. (2011). Las lagunas altoandinas del Perú: Diversidad y conservación. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Parkin, T. B., et al. (2016). Evaluación de Factores en el Desamargado de Tarwi. *Agroindustrial Science*, 12(1), 103-121.
- Evaluación de Factores en el Desamargado de Tarwi - 1139-3181-2016 - Studocu
- Paz, F., Casiano, M., & Cruz, C. O. (2017). MUESTREO SEMICUANTITATIVO INVENTARIO FORESTAL ESTATAL CUANTITATIVO Vegetación Hidrófila.
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503–510. <https://doi.org/10.1016/J.TREE.2005.05.011>
- Python (2025). SciPy: Scientific computing tools for Python [Biblioteca]. Disponible en <https://scipy.org>.
- Ramos Vásquez, E., & Dávila, D. Z. (2008). EFECTO DE LA HUMEDAD, TEMPERATURA Y PH DEL SUELO EN LA ACTIVIDAD MICROBIANA A NIVEL DE LABORATORIO SOIL MICROBIAL ACTIVITY IN RESPONSE TO DIFFERENT CONDITIONS OF MOISTURE, TEMPERATURE OR PH. *Ecología Aplicada*, 7(1).
- Ramsar (2015). The Ramsar Convention on Wetlands and Climate Change. Ramsar Secretariat.
- RAMSAR. (2014). El Plan Estratégico de Ramsar para 2009-2015. Adoptado por la Resolución X.1 (2008) y ajustado para el trienio 2013-2015 p. Resolución XI.3 (2012).
- Ramsar. (2020). LOS HUMEDALES Y LA CAPTURA DE CARBONO.
- Riebeek, H. (2011, 16 de junio). The carbon cycle (R. Simmon, Diseño). NASA Earth Observatory. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>
- Roa-García, M. D., & Brown, J. (2016). La amenaza de la degradación de los humedales y su impacto en la biodiversidad. *Ecología Aplicada*, 14(1), 13-28.
- Roa-García, M., & Brown, D. (2016). Wetland ecosystem services and their contribution to the global carbon cycle. *Environmental Science & Policy*, 55, 23-32.
- Roa-García, M. C., & Brown, S. (2016).** Carbon storage and soil properties of Andean peatlands in Colombia. *Wetlands Ecology and Management*, 24(6), 763–776. <https://doi.org/10.1007/s11273-016-9487-7>
- Robertson, G. P., et al. (2014). The role of soils in mitigating global climate change. *Global Change Biology*, 20(8), 2773-2790.

- Rosenzweig, C., et al. (2001). *Climate Change and Biodiversity*. Cambridge University Press.
- Sala, O. E., et al. (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287(5459), 1770-1774.
- Salvador Perez María, F. de maria, & Cano Echevarría, A. (2017). *LAGUNAS YOCONALES: LOS HUMEDALES DEL TRÓPICO ANDINO*. Cuadernos de Biodiversidad.
- Schimel, D. S., et al. (1994). The role of nitrogen in the net primary productivity of wetlands. *Ecological Applications*, 4(4), 661-678.
- SENAMHI. (2011). *IMPACTO DEL CAMBIO CLIMATICO EN CULTIVOS ANUALES DE LAS REGIONES DE CUSCO Y APURÍMAC*.
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, 52(3/4), 591–611. <https://doi.org/10.2307/2333709>
- Soil Science Society of America. (2021). *Glossary of soil science terms 2021*. SSSA. <https://www.soils.org/publications/soils-glossary>
- Student. (1908). The probable error of a mean. **Biometrika**, 6(1), 1–25. <https://doi.org/10.1093/biomet/6.1.1>
- Suaña Jaen, H. I. (2023). Estimación de la captura de (CO₂) en totora (*Schoenoplectus tatora*) de la laguna altoandina Orurillo–Puno [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana Unión]. Repositorio UPEU. <https://repositorio.upeu.edu.pe/items/b15797fc-e381-476d-8a43-2061d62810f5>
- Tarnocai, C., et al. (2009). Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(1)..
- Taylor, L. L., et al. (2008). Quantifying root biomass and carbon storage in temperate forest ecosystems. *Journal of Forest Research*, 13(3), 345-352
- The Blue Carbon Partnership. (2015). What is blue carbon and why is it important? Recuperado de https://www.bluecarbonpartnership.org/wp-content/uploads/2020/11/ENV001_fact_sheet_V05.pdf
- Tovar, J. (2010). Vegetación y ecosistemas en las regiones andinas del Perú: Adaptaciones y distribución. *Revista Ecológica*, 18(2), 105-120.
- Tucto, D. (2014). Estudio ecológico de los humedales de la región Cusco. *Revista de Biología*, 20(3), 150-160.
- Tukey, J. W. (1949). Comparing individual means in the analysis of variance. **Biometrics**, 5(2), 99–114. <https://doi.org/10.2307/3001913>
- SERFOR. (2017). *Marco metodológico del Inventario Nacional Forestal y de Fauna Silvestre*. Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre.
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241(2), 155–176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- UNLP. (2015). Humedales: reservas de vida en peligro de extinción. Retrieved February 24, 2025, from <https://unlp.edu.ar/investiga/especiales/humedales-17562-22562/>
- Van der Valk, A. G. (2005). *Water Level Fluctuations in Wetlands: Restoration and Management*. Springer.
- Verhoeven, J. T. A., Arheimer, B., Yin, C., & Hefting, M. M. (2006). Regional and global

- concerns over wetlands and water quality. *Trends in Ecology & Evolution*, 21(2), 96–103. <https://doi.org/10.1016/J.TREE.2005.11.015>
- VERMONT. (2014). *Hydrophytic Vegetation* | Department of Environmental Conservation. Retrieved February 24, 2025, from <https://dec.vermont.gov/watershed/wetlands/what/wetland-identification-and-delineation/hydrophytic-vegetation>
- VICUÑA MIÑANO, E., BAKER, T. R., BANDA-R., K., HONORIO CORONADO, E., MONTEAGUDO, A., PHILLIPS, O. L., DEL CASTILLO TORRES, D., FARFAN RIOS, W., FLORES, G., HUAMAN, D., TANTTE HUAMAN, K., HIDALGO PIZANGO, G., LOJAS ALEMAN, E., MELO, J. B., PICKAVANCE, G. C., RIOS, M., ROJAS, M., SALINAS, N., & VASQUEZ MARTINEZ, R. (2018). EL SUMIDERO DE CARBONO EN LOS BOSQUES PRIMARIOS AMAZÓNICOS ES UNA OPORTUNIDAD PARA LOGRAR LA SOSTENIBILIDAD DE SU CONSERVACIÓN.
- Vicuña Miñano, E., R.Baker, T., & Banda-R, K. (2025.). EL SUMIDERO DE CARBONO EN LOS BOSQUES PRIMARIOS AMAZÓNICOS ES UNA OPORTUNIDAD PARA LOGRAR LA SOSTENIBILIDAD DE SU CONSERVACIÓN. Retrieved February 24, 2025, from <https://revistas.iiap.gob.pe/index.php/foliaamazonica/article/view/456/515>
- Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiologia*, 674(1), 133–156. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0738-9>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.
- Walsh Perú. (2007). *Fauna de la región lacustre altoandina del Perú*. Informe técnico.
- Yanque–Yucra, P., Arce Ttito, M., & Nina–Loayza, Y. (2019). Estado ecológico del humedal urbano Phuyuqocha - Cajonahuaylla, San Jerónimo – Cusco – Perú. *Cantua*, ISSN-e 2709-8818, ISSN 2221-6928, Vol. 18, No. 1, 2019 (Ejemplar Dedicado a: Enero-Diciembre), Págs. 1-8, 18(1), 1–8. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9946925&info=resumen&idioma=>