



diakonia

GENTE QUE CAMBIA EL MUNDO



Agua Sustentable



TEMÁTICA: BOFEDALES

RELACIÓN DE LA COMPOSICIÓN FLORÍSTICA Y SU BIOMASA SUBTERRÁNEA CON LAS VARIABLES HIDROLÓGICAS EN BOFEDALES DE SAJAMA, BOLIVIA

Arely N. Palabral Aguilera
Investigadora Botánica
Herbario Nacional de Bolivia
2013

Contenido

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 2 |
| OBJETIVOS | 4 |
| ÁREA DE ESTUDIO..... | 4 |
| MÉTODOS | 6 |
| Diseño de muestreo y análisis de datos | 6 |
| Relevamiento de la vegetación..... | 6 |
| Caracterización del suelo o sustrato | 7 |
| Determinación de la densidad aparente y porosidad | 8 |
| Determinación del contenido de humedad del suelo | 8 |
| RESULTADOS Y DISCUSIONES | 9 |
| Riqueza y abundancia de especies vegetales en los bofedales | 9 |
| Características morfológicas de la biomasa subterránea | 14 |
| Caracterización del suelo o sustrato | 18 |
| Profundidad del bofedal..... | 22 |
| Relaciones morfológicas de las especies dominantes con variables ambientales | 24 |
| CONCLUSIONES..... | 26 |
| AGRADECIMIENTOS..... | 26 |
| LITERATURA CITADA..... | 27 |
| ANEXOS | 29 |

RELACIÓN DE LA COMPOSICIÓN FLORÍSTICA Y SU BIOMASA SUBTERRÁNEA CON LAS VARIABLES HIDROLÓGICAS EN BOFEDALES DE SAJAMA

Arely N. Palabral Aguilera

INTRODUCCIÓN

Los bofedales en el Parque Nacional Sajama representan un 10% del territorio del área protegida, y se constituyen en la unidad de vegetación de mayor importancia socioambiental por el aprovechamiento que hacen de éstos las comunidades locales (Ribera & Liberman 2006). Por el forraje altamente nutritivo y palatable que proveen a lo largo del año se constituyen en ecosistemas importantes para la cría de ganado camélido (Spehn *et al* 2006, Beck *et al* 2010), en una zona donde esta actividad es tradicional y extensiva, pues el 83% del Parque es utilizado para esta práctica, se realiza además el aprovechamiento sostenible de la fibra de vicuña a través de uno de los programas de conservación más importantes de Bolivia (Ribera & Liberman 2006).

En Sajama, los bofedales más extensos están ubicados en las grandes depresiones cerca de los ríos y riachuelos, entre 3.950 y 4.300 m sobre el nivel del mar, y en los valles interglaciares, entre 4.500 y 4.800 m (Beck *et al.* 2010). Su importancia ecológica radica en las diversas funciones ecosistémicas que tiene, ya que se constituyen en el hábitat de numerosas especies de plantas y animales silvestres, y cumplen funciones importantes asociadas al ciclo hidrológico local y regional, como es (1) el control y regulación de corrientes acuíferas, (2) el control de la erosión, (3) la asimilación de agua, y (4) la provisión de fuentes-sumidero de sedimentos (para mayor detalle ver Earle *et al* 2003).

Se puede definir a los bofedales como praderas naturales que se desarrollan en áreas constantemente saturadas de agua, y por esta característica se consideran ecosistemas particularmente vulnerables al cambio climático y al sobrepastoreo (Beck *et al.* 2010). Como la permanencia de un bofedal se encuentra fuertemente asociado al continuo aporte hídrico ya sea por precipitación, alimentación por aguas subterráneas o cuerpos de agua cercanos (como lagunas o ríos), y/o deshielo de los glaciares (Zavala & Cepeda 2006); resultan ecosistemas altamente sensibles al cambio climático; particularmente por alteraciones en el patrón de lluvias y la pérdida o retroceso de glaciares (Squeo *et al* 2006).

Asimismo, cambios drásticos en el régimen hídrico que alimenta a los bofedales puede asociarse con la desviación de los cursos de agua por actividades humanas (como la agricultura, minería, etc.), o debido a las actividades insostenibles como el sobrepastoreo; que puede producir el rápido desecamiento y degradación de estos ecosistemas y/o cambios en la diversidad de especies que los componen (Spehn *et al* 2006).

Según el nivel de agua que poseen, se los puede clasificar en dos tipos:

1. *Bofedales permanentemente húmedos o hidromórficos*, ubicados en los fondos de los valles, cerca de ríos y arroyos o en laderas con vertientes u ojos de agua. Este tipo de bofedal se encuentra especialmente en las planicies de inundación de llanuras y poseen una irrigación continua a lo largo de todo el año (Pacheco 1996). Los suelos son húmicos con gran cantidad de materia orgánica, formando esencialmente una turbera de alta montaña. La vegetación predominante está constituida por cojines de *Oxychloe andina*, *Distichia muscoides* y *Plantago tubulosa*. Entre los cojines también crecen varias plantas pequeñas como *Werneria pygmaea*, *Gentiana sedifolia* y *Phylloscirpus boliviensis*. Al borde de los ojos de agua se encuentran *Deyeuxia chrysantha* y *D. spicigera* (Beck *et al.* 2010).
2. *Bofedales temporalmente húmedos o méxicos*, que pierden agua durante la época seca, produciendo la descomposición de los cojines y la acumulación de sales en el suelo. Usualmente esta formación está asociada con los collpares (Beck *et al.* 2010).

Desde el año 2012 Agua Sustentable realiza el monitoreo de dos bofedales en la microcuenca del Sururía en el PN Sajama. Los primeros resultados muestran un patrón casi invariable a lo largo del año en la columna de agua en el bofedal de Aychuta (Lorini 2012), ubicado a 4850 m de altitud, y un leve descenso en el nivel de agua en los meses de época seca en el bofedal de Lagunas, que se encuentra a 4180 msnm, aproximadamente 700 m más bajo que Aychuta. En base a estos resultados se plantea la hipótesis de que la biomasa subterránea o el sistema radicular de las plantas dominantes en cada bofedal afectarían en la capacidad de retención hídrica de los mismos y por tanto influirían en la dinámica hidrológica de estos ecosistemas.

El control de la corriente en el bofedal se relaciona con su capacidad de absorber agua como una esponja y regular su gradual eliminación, esto se debe a la naturaleza porosa y al crecimiento dominante y compacto de Juncáceas como *Oxychloe andina* y *Distichia muscoides*,

que permiten retener grandes volúmenes de agua proveniente de riachuelos y constituyen zonas de “ahorro” de descarga, reduciendo así la velocidad de la corriente.

La biomasa por sobre y debajo del suelo son componentes importante de los ecosistemas terrestres, y aunque los patrones de distribución de la biomasa aérea en ecosistemas terrestres están razonablemente bien entendidos, el conocimiento de la biomasa subterránea y su distribución aún es muy limitado (McNaughton *et al* 1998). Esta disparidad se debe principalmente a las dificultades metodológicas asociadas con la observación y medida de la biomasa radicular (Vogt *et al* 1996, Titlyanova *et al* 1999). Este estudio mide una serie de características morfológicas de la biomasa subterránea de los bofedales y los correlaciona con los datos meteorológicos, hídricos y características estructurales del suelo disponibles en la zona.

OBJETIVOS

- A. Describir la composición de especies vegetales en los bofedales de Aychuta y Lagunas de la microcuenca glacial del río Sururúa, y del bofedal de Aynacha Pacoco de la microcuenca del río Ventilla.
- B. Relacionar las características morfológicas del sistema radicular y/o biomasa subterránea de las especies dominantes de los bofedales mencionados, con variables hidrológicas de relevancia.

ÁREA DE ESTUDIO

El Parque Nacional Sajama (PNS) se encuentra ubicado al noroeste de la Cordillera Andina de Bolivia, a los 18°09'S y 69°00'O, en la provincia Sajama del departamento de Oruro, Bolivia. La vegetación es denominada puna desértica, ubicada dentro de la puna sureña, una de las áreas más áridas y desérticas de Bolivia (Ibisch *et al* 2003). Ésta se caracteriza por una escasa cobertura vegetal, debido a las reducidas precipitaciones estacionales y a las bajas temperaturas (Beck *et al* 2010).

El clima de la zona se caracteriza por ser semiárido y frío, con dos épocas marcadas en el año: la seca, que transcurre entre los meses de abril a noviembre, y la húmeda, de diciembre a marzo, y donde se produce cerca del 90% de precipitación anual en el 2012 (datos SENAMHI Oruro). La temperatura media anual se encuentran alrededor de los 10°C, y las temperaturas en la noche son inferiores a los 0°C. La precipitación anual no suele superar los 300 mm y presenta una distribución monomodal, siendo enero el mes más húmedo. Además la zona se caracteriza por recibir una alta radiación solar durante el día y vientos constantes y variables (Domic 2005).

Los bofedales estudiados en las microcuencas del río Sururúa y Ventilla son los siguientes:

- Bofedal de Aychuta, ubicado en la orientación sur del nevado Sajama a 4850 m de altitud, tiene un área de 14 hectáreas aproximadamente y pertenece a la microcuenca glacial del río Sururúa.
- Bofedal de Lagunas, a 4180 m de altitud se encuentra cerca de la carretera internacional, en inmediaciones a la comunidad del mismo nombre, tiene una extensión aproximada de 100 hectáreas y también pertenece a la microcuenca del Sururúa.
- Bofedal de Aynacha Pacoco, que estructuralmente se asemeja al bofedal de Aychuta y puede accederse a él desde la comunidad de Cosapa, por un camino de tierra en regular estado. Pertenece a la microcuenca del río Ventilla.



Figura 1. Vista del bofedal de Lagunas (izquierda) y de Aynacha Pacoco (derecha).

MÉTODOS

Diseño de muestreo y análisis de datos

Relevamiento de la vegetación

Con la finalidad de describir la composición y abundancia de especies vegetales en los bofedales de Aychuta, Lagunas y Aynacha Pacoco, se empleó una modificación del sistema fitosociológico de Braun-Blanquet (Matteucci & Colma 1982) aplicado a un área de 1 m² ubicado en inmediaciones a los piezómetros monitoreados por “Agua Sustentable”. Este método permitirá describir las comunidades vegetales según su flora y se identificarán principalmente las especies dominantes en valores porcentuales.



Figura 2. Cuadrante de evaluación de 1 m² en el bofedal.

Empleando una modificación de las “**Curvas Whittaker**” se describirá la riqueza, abundancia y equitatividad de especies presentes en cada bofedal, tomando como unidad de muestreo el valor promedio porcentual de cobertura de cada especie presente en el cuadrante de 1 m². Posteriormente se cuantificará la similitud en la composición de especies entre los bofedales empleando la Similitud Proporcional (SP) (Feinsinger 2003).

$$SP = \sum \min(p_{i1}p_{i2})$$

Donde p_i es la proporción de individuos en cada comunidad, que pertenece a la especie i y se calcula:

$$p_i = n_i/N$$

Donde n_i es el número de individuos de la especie i y N es el número total de especies.

Para cada especie i que está presente en una o ambas muestras, se anota el menor de los valores de p_i , es decir, p_{i1} o p_{i2} . Si una especie está ausente de una de las muestras, el menor valor es cero, y se suman los valores registrados.

Los valores de SP varían entre 0 (ninguna especie en común) y 1.0 (ambas muestras son idénticas en composición y proporción de especies), y puede expresarse en porcentaje.

Caracterización del suelo o sustrato

En lugares donde la composición y abundancia de la vegetación es similar al área de los piezómetros, se extrajo una muestra de suelo a fin de observar las siguientes características:

- Longitud, grosor y forma de las raíces o biomasa subterránea de las especies dominantes.
- Empleando las manos y la observación se catalogó el suelo en porcentaje de materia orgánica, arcilla, limo o arena.

Cada una de estas variables se relacionaron con los valores piezométricos para determinar si existe una relación positiva entre la mayor retención de agua medida por los piezómetros y la morfología de la raíz o la biomasa subterránea.



Figura 3. Piezómetro monitoreado por Agua Sustentable en el bofedal de Lagunas.

Determinación de la densidad aparente y porosidad

Empleando la metodología descrita por Llambi (*et al* 2012) se calculará la densidad aparente en base a la relación que hay entre la masa del suelo seco y el volumen que ocupa ese suelo.

$$da = Mss / V$$

Dónde da es la densidad aparente del suelo (g/cm^3), Mss es la masa del suelo seco (g) y V el volumen del cilindro con que se obtiene la muestra de suelo (cm^3). Mientras más alto es el contenido de materia orgánica, menor será la densidad aparente.

A partir de la densidad aparente se puede calcular la porosidad del suelo, que es el espacio que no está ocupado por sólidos:

$$P = (1-da/dr)*100$$

Donde P es la porosidad y se representa en porcentaje (%), dr la densidad real o densidad de la parte sólida, y se asume como valor fijo ($2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$) que corresponde al valor de la densidad de las arenas o minerales de cuarzo.

Determinación del contenido de humedad del suelo

Se calculó el contenido de humedad del suelo utilizando las siguientes relaciones (Llambi *et al* 2012):

Humedad gravimétrica (relación entre la masa de agua y la masa de suelo seco)

$$\Theta_m = ((Msh - Mss)/Mss)*100$$

Donde:

Θ_m = contenido gravimétrico de agua del suelo (%)

Msh = masa del suelo húmedo (g)

Mss = masa del suelo seco (g)

$Msh - Mss$ = masa de agua

Humedad volumétrica (relación al volumen)

$$\Theta_v = \Theta_m da$$

Donde:

Θ_v = contenido volumétrico de agua del suelo (%)

da = densidad aparente

Se trató de obtener un número de muestras equivalente al número de piezómetros de cada bofedal y se tuvo el cuidado de extraerlas a una distancia mínima de 3 m a fin de evitar alguna influencia a los datos de los piezómetros (Fredy Soria, hidrólogo, com. pers.).

Por último, se midió la profundidad que alcanza el bofedal en inmediaciones a los piezómetros, lo que da una idea de la cantidad de agua y carbono que el suelo puede almacenar, y al mismo tiempo conocer el espacio disponible para las raíces de algunas especies.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Riqueza y abundancia de especies vegetales en los bofedales

En total se realizaron 9 relevamientos en cuadrantes de 1m² en el bofedal de Lagunas, 8 en Aynacha Pacoco y 11 en el bofedal de Aychuta, todos en inmediaciones a los piezómetros monitoreados por Agua Sustentable. Se registraron 29 especies de plantas vasculares en el bofedal de Lagunas, 20 en el bofedal de Aychuta y 17 en el de Aynacha Pacoco (ver tabla 1). Los briófitos, que engloba a musgos y hepáticas, no fueron diferenciados en especies en los cuadrantes evaluados y se los engloba como un solo grupo en tablas y gráficas.

Tabla 1. Lista de especies encontradas en los bofedales estudiados.

| Familia / Especie | Aychuta | Aynacha Pacoco | Lagunas |
|-----------------------------------|----------|----------------|----------|
| Apiaceae | | | 1 |
| <i>Lilaeopsis macloviana</i> | | | x |
| Asteraceae | 5 | 3 | 7 |
| <i>Cuatrecasasiella argentina</i> | x | | x |
| <i>Hypochaeris taraxacoides</i> | | | x |
| <i>Oritrophium limnophilum</i> | | | x |
| <i>Werneria apiculata</i> | x | | x |
| <i>Werneria heteroloba</i> | x | x | x |
| <i>Werneria pygmaea</i> | x | x | x |
| <i>Werneria spathulata</i> | x | x | x |
| Briofito | ? | ? | ? |
| Musgos / Hepáticas | x | | x |
| Campanulaceae | 1 | 1 | 1 |
| <i>Lobelia olygophylla</i> | x | x | x |
| Caryophyllaceae | 1 | 1 | 1 |
| <i>Arenaria</i> | x | x | x |
| Cyperaceae | 6 | 3 | 6 |

| Familia / Especie | Aychuta | Aynacha Pacoco | Lagunas |
|--------------------------------------|----------------|-----------------------|----------------|
| <i>Carex cf. maritima</i> | x | x | x |
| <i>Eleocharis</i> | x | | x |
| <i>Eleocharis albibracteata</i> | | | x |
| <i>Eleocharis tucumanensis</i> | x | | x |
| <i>Phylloscirpus boliviensis</i> | | x | x |
| <i>Phylloscirpus deserticola</i> | x | x | x |
| <i>Zameioscirpus cf. atacamensis</i> | x | | |
| <i>Zameioscirpus muticus</i> | x | | |
| Gentianaceae | 1 | 1 | 1 |
| <i>Gentiana sedifolia</i> | x | x | x |
| Gramineae | 4 | 3 | 5 |
| <i>Deyeuxia eminens</i> | x | | |
| <i>Deyeuxia heterophylla</i> | | | x |
| <i>Deyeuxia spicigera</i> | x | x | x |
| <i>Deyeuxia vicunarum</i> | | | x |
| <i>Festuca orthophylla</i> | x | | |
| <i>Festuca rigescens</i> | | x | |
| <i>Poa gymnantha</i> | | x | x |
| <i>sp. 1</i> | x | | |
| <i>sp. 2</i> | | | x |
| Juncaceae | 2 | 3 | 3 |
| <i>Distichia muscoides</i> | x | x | x |
| <i>Juncus stipulatus</i> | | x | x |
| <i>Oxychloe andina</i> | x | x | x |
| Orchidaceae | | 1 | 1 |
| <i>Myrosmodes paludosa</i> | | x | x |
| Plantaginaceae | | 1 | 1 |
| <i>Plantago tubulosa</i> | | x | x |
| Rosaceae | | | 2 |
| <i>Lachemilla diplophylla</i> | | | x |
| <i>Lachemilla pinnata</i> | | | x |
| Riqueza de especies | 21 | 18 | 30 |

En este estudio, la riqueza de especies encontrada en los bofedales se acerca al promedio (de 24 especies) registrado en estudios similares (ver Meneses 2012), a pesar incluso de comparar resultados obtenidos por métodos diferentes.

El trabajo de Sandoval (ver Lorini 2012) en los bofedales de Aychuta y Lagunas, empleando líneas de intercepción para el relevamiento de vegetación, obtiene una riqueza similar de especies a los que se reportan en este trabajo, aunque en composición pueden encontrarse

diferencias atribuibles a la heterogeneidad de ambientes que atravesaría una línea de 50 m de longitud. El método que se emplea aquí (cuadrantes de 1 m²), enfoca el esfuerzo de muestreo a un área particular y más homogénea.

La riqueza y composición de especies también puede estar afectada por diversos factores, como el sobrepastoreo, el cual pueden ocasionar erosión y disminuir la capacidad de retención de agua y nutrientes en el suelo, lo que reduciría la fertilidad y el desarrollo de la vegetación natural (Llambi *et al* 2012). El bofedal de Lagunas fue catalogado con una alta presión de pastoreo según el trabajo de Viviana Casas (ver Lorini 2012) determinándose una sobrecarga animal de 4.7 veces superior a la capacidad de carga que podría soportar. Esta presión de pastoreo representaría una causa importante de degradación de los bofedales y afectaría tanto a la estructura del bofedal como a la composición de especies. *Distichia muscoides* por ejemplo, es una especie vulnerable al sobrepastoreo por ser altamente palatable para el ganado; lo mismo *Oxychloe andina* que posiblemente gracias a la baja presión de pastoreo en Aychuta y Aynacha Pacoco es la especie ampliamente dominante en esos bofedales.

Sin embargo, los bofedales son ecosistemas dinámicos y su composición de especies también puede estar afectada por el tipo y nivel de uso que realiza la gente de ellos, la influencia de la vegetación circundante, la edad, los diferentes estadios de desarrollo y el nivel de agua que recibe. *Plantago tubulosa* por ejemplo puede soportar condiciones menos favorables de humedad así como *Phylloscirpus desertícola*, y por eso es común encontrarlos en los bordes de bofedal o en ambientes más secos. *Distichia muscoides* en cambio es muy sensible al desecamiento.

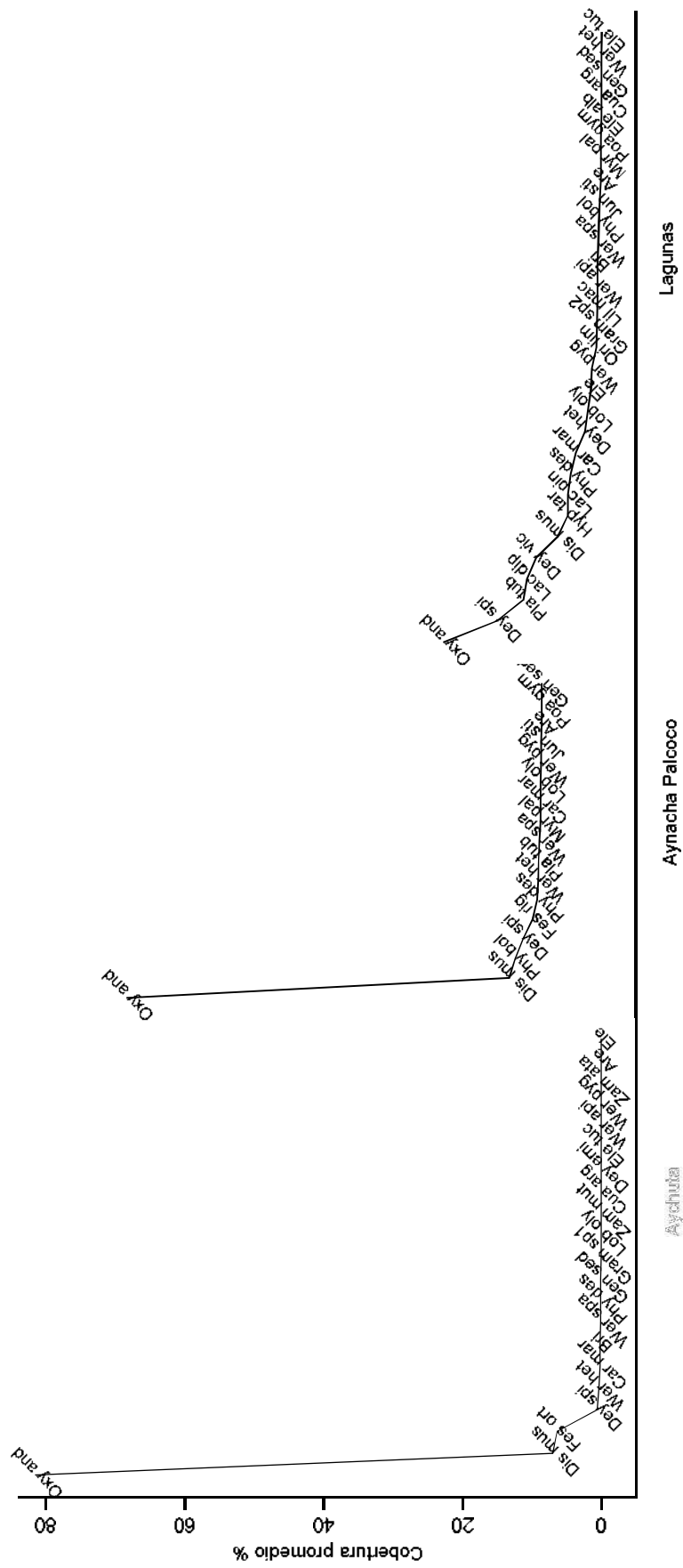


Figura 4. “Curvas de Whittaker” que grafican la presencia de especies en los bofedales de Aychuta, Lagunas y Aynacha Palcoco. Los nombres abreviados toman las 3 primeras letras de cada palabra, (p.e. *Oxychloa andina* es Oxy and). El eje X indica la composición de especies de los bofedales estudiados y el eje Y la abundancia promedio en valor porcentual.

En la figura 4 se puede observar que los tres bofedales están compuestos de forma dominante por *Oxychloe andina*, aunque en el caso de Lagunas también se halla una elevada presencia de gramíneas (*Deyeuxia spicigera*, *D. vicunarum*, *D. heterophylla*), Rosaceae (principalmente *Lachemilla diplophylla*) y una Plantaginaceae típica de bofedales en proceso de desecamiento (*Plantago tubulosa*).

Lagunas es el bofedal que muestra una mayor equitatividad de especies, como se aprecia en la forma de la curva (figura 4), los bofedales de Aychuta y Aynacha Pacoco en cambio muestran una pendiente abrupta dada por la marcada dominancia de *Oxychloe andina*. Así mismo, las especies de la cola son aquellas que tuvieron una escasa cobertura en el cuadrante y muchas veces su presencia (o ausencia) puede atribuirse sólo a un azar del muestreo. Por ejemplo en Aychuta, debido a que el piezómetro 11 se ubicó en un área adyacente fuera del bofedal, se incluye a la gramínea *Festuca orthophylla*. Tal vez sea preferible no considerar los datos de este cuadrante por no establecerse en un bofedal en sí, no obstante su cercanía.

En campo se observó que cuando existe una alta dominancia de *Oxychloe andina* en el bofedal, son pocas las especies que pueden crecer en medio de los cojines que conforma. Solamente especies pequeñas como *Arenaria*, *Gentiana sedifolia* o los briófitos en general, prosperan sin ningún inconveniente, así como las gramíneas. Esto puede deberse a la morfología que tiene *Oxychloe andina*, con hojas largas, punteagudas y lignificadas que llegan incluso a penetrar o cubrir los cojines de *Distichia* (Ruthsatz 2012) y que dificultarían la presencia de otras especies en el cojín.

El ancho de cada curva también muestra de forma gráfica la mayor riqueza de especies en el bofedal de Lagunas con respecto a los bofedales de Aychuta y Aynacha Pacoco.

Por último, la tabla 2 muestra que existe una similitud muy elevada de 99.7% en las especies encontradas en los bofedales de Aychuta y Aynacha Pacoco, mientras que la similitud entre Aynacha Pacoco y Lagunas apenas llega al 28.9% y levemente mayor entre Aychuta y Lagunas con 34.2%.

Tabla 2. Datos de similitud florística (SP) entre los bofedales de Aychuta, Lagunas y Aynacha Pacoco.

| | Lagunas | Aychuta |
|----------------|---------|---------|
| Aynacha Pacoco | 28.9 % | 99.7 % |
| Aychuta | 34.2 % | |



Características morfológicas de la biomasa subterránea

Al momento de caracterizar el sistema radicular, o biomasa subterránea, sólo se consideraron las especies dominantes de los bofedales. *Oxychloe andina* con una dominancia que fácilmente sobrepasa el 70% de cobertura vegetal promedio y *Distichia muscoides* con 50% de cobertura en el piezómetro 9 (PA9) fueron las especies escogidas en el bofedal de Aynacha Pacoco. Para el caso de Lagunas se escogieron aquellas de cobertura mayor al 20% en inmediaciones a las áreas de piezómetros evaluados.

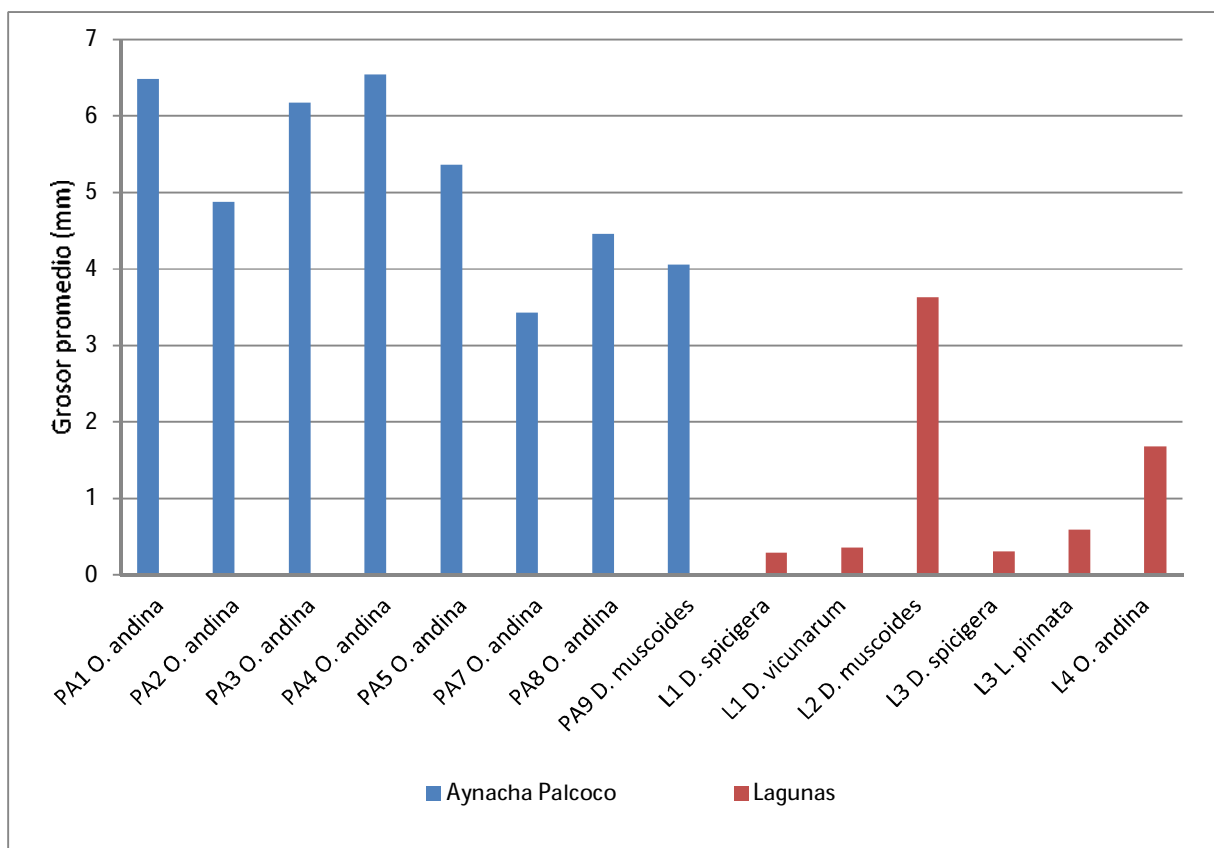


Figura 5. Relación del grosor de la raíz o biomasa subterránea en las especies dominantes de los bofedales.

A causa del deterioro de material en el campo, no se pudo obtener muestras de suelo y de vegetación en el bofedal de Aychuta (y el muestreo en el bofedal de Lagunas también tuvo sus limitaciones) pero se puede asumir que el grosor de la biomasa subterránea de *O. andina* en Aychuta sería muy similar a lo que se observa en Aynacha Pacoco (figura 5).

Las especies evaluadas presentaron marcadas diferencias en el grosor de las raíces (figura 6, ANOVA $F=50,13$; $P<0.000$) así como en su longitud (figura 8) asociado principalmente a la característica que tiene *Oxychloe andina* y *Distichia muscoides* de crecer indefinidamente desde la parte apical del tallo, mientras la parte inferior va muriendo paulatinamente en forma similar a las especies de musgo *Sphagnum* (Ruthsatz 2012, figura 7). Esta característica particular, sumada a las condiciones anaeróbicas y la baja temperatura del ambiente, resultan en una descomposición lenta de la celulosa por parte de las bacterias, que además están limitadas por una elevada acidez que presentan los suelos de bofedales (Estensoro 1991).

Ahora bien, aunque es difícil discriminar una raíz en estas especies, tal vez es más apropiado hablar de una biomasa subterránea, pues el tallo y hojas van quedando sepultados conforme la planta crece, y ambas van aportando materia orgánica al sustrato.

Las raíces de las especies del bofedal de Lagunas en cambio, no solamente son delgadas sino también superficiales y con dificultad algunas sobrepasan los 20 cm de profundidad, siendo más del tipo adventicio en gramíneas (*D. spicigera* y *D. vicunarum*) y una raíz superficial y con estolones para el caso de *Lachemilla pinnata*. Esta diferencia crucial fue observada en la muestra de suelo a 20 cm de profundidad en el bofedal de Lagunas, y ésta característica persistió incluso en cercanías al piezómetro con dominancia de *Oxychloe*, pues tenía apenas 4 cm de profundidad en hojas y tallos enterrados y unas raíces que apenas alcanzaron 4 cm de profundidad.

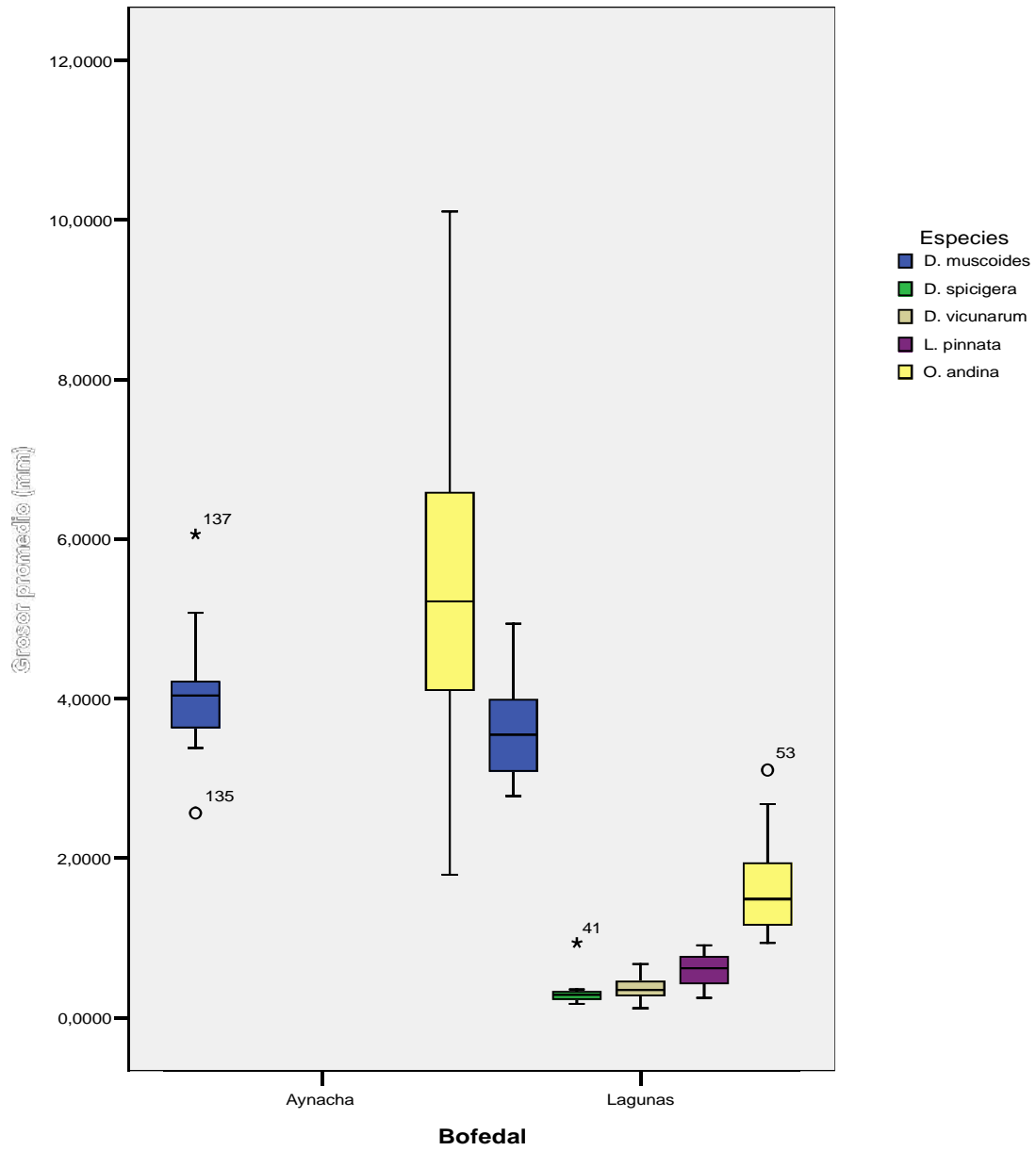


Figura 6. Variación del grosor promedio de las raíces en las especies dominantes de los bofedales de Aynacha Pacoco y Lagunas.



Figura 7. *Distichia muscoides* (izquierda) y *Oxychloe andina* (derecha) mostrando la biomasa subterránea que forman al crecer.

Gracias a la instalación de piezómetros en el bofedal de Aynacha Pacoco, y al bajo nivel de descomposición que tiene la materia orgánica en las condiciones anteriormente descritas, se pudo observar hasta que profundidad llegan las raíces de *Oxychloe andina* en este bofedal, y se realizó una estimación porcentual de la cantidad de raíces presentes hasta una profundidad de 180 cm (figura 8).

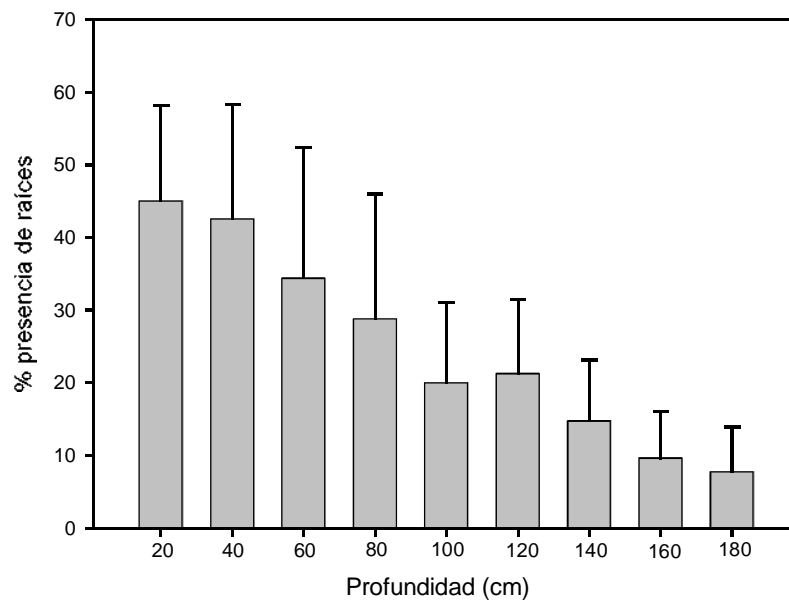


Figura 8. Longitud media de las raíces de *Oxychloe andina* en el bofedal de Aynacha Pacoco.

Caracterización del suelo o sustrato

En Aynacha Pacoco, cada 20 cm de profundidad se catalogó el sustrato en porcentaje de materia orgánica, arcilla, limo o arenisca (figura 9). Los valores promedio muestran un descenso paulatino en el porcentaje de materia orgánica (MO) conforme se aumenta la profundidad, y un incremento en el porcentaje de sedimento, ya sea este limo, arena o arcilla. En el caso de Lagunas (L en el gráfico) solamente se obtuvieron datos del suelo superficial, pero claramente presenta un menor porcentaje promedio de materia orgánica.

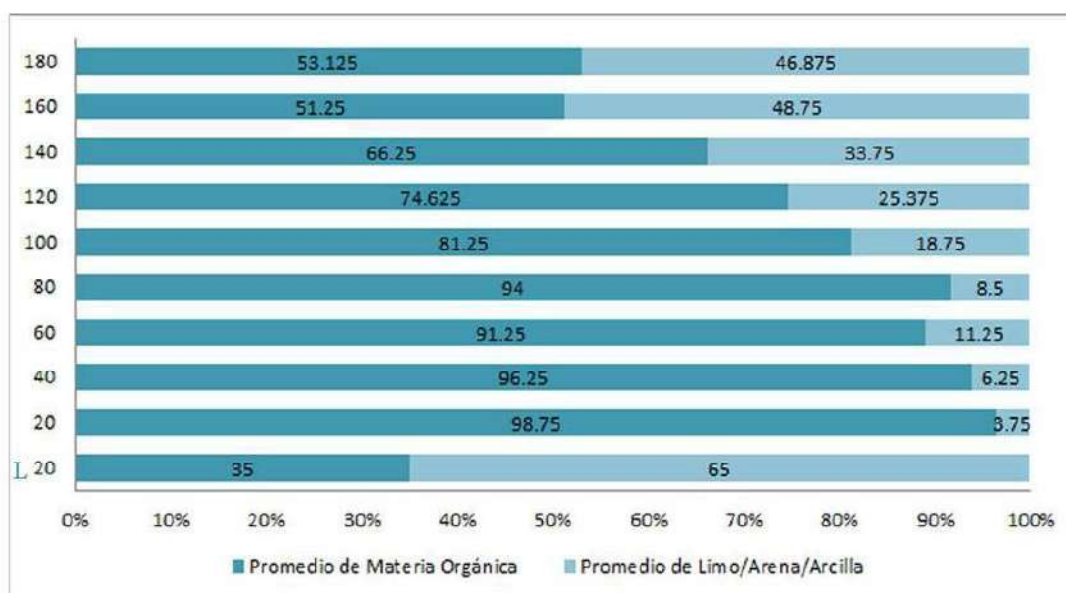


Figura 9. Tipo de sustrato presente en el bofedal de Lagunas (L) y de Aynacha Pacoco, en relación a la profundidad (cm).

Los datos brutos en Aynacha Pacoco mostraron que en algunos niveles el porcentaje de arena o arcilla aumentaba abruptamente, y en el siguiente volvía a predominar la materia orgánica. Esto según Estensoro (1991) es algo característico en los bofedales, pues el sustrato alterna capas de arcilla o arena con capas de materia orgánica amorfa. Tal vez esta característica esté relacionada con el flujo hídrico en el interior del bofedal o sean testigos de antiguas fluctuaciones en el área del bofedal, ya sea por arrastre de material en época de lluvia desde las laderas que lo rodean o tal vez por eventos extremos de temperatura o poca precipitación.

En general el suelo en los bofedales puede caracterizarse como una combinación de materia orgánica y sedimentos arenosos o arcillosos, relativamente húmedos, oscuros y con una gran capacidad de retención líquida.

En el bofedal de Aynacha Pacoco las muestras de suelo obtenidas a 1.4 m de profundidad contienen entre 60 a 90% de agua entre sus espacios porosos, y tienen entre 75 a 95% de porosidad (ver tabla 3) siendo el reflejo de un elevado porcentaje de materia orgánica (MO, ver figura 9).

El alto contenido de materia orgánica en bofedales como Aychuta y Aynacha Pacoco permiten la captación y acumulación de agua en el suelo, para luego liberarla lentamente. Esta regulación se debe a que estos suelos funcionan como una esponja, que absorbe agua proveniente de las precipitaciones y el deshielo de glaciares, y la libera lentamente hacia el subsuelo o la superficie.

La capacidad de retención de agua en los suelos depende mucho de la porosidad, los microporos en particular juegan un rol muy importante ya que durante el secamiento el agua dreña por gravedad por los poros grandes y únicamente en los poros finos pueden actuar las fuerzas de atracción de las partículas reteniendo el agua (Llambi *et al* 2012). Los suelos del bofedal de Aynacha Pacoco estarían entre los que presentan mayor porosidad con valores por encima del 75% (ver Tabla 3). Esto nos da una idea de cuánta agua puede contener un suelo con estas características.

Tabla 3. Datos descriptivos del suelo a 1.4 m de profundidad en el bofedal de Aynacha Pacoco. Densidad aparente (d_a), porosidad, contenido de humedad del suelo Θ_m y contenido volumétrico de agua del suelo Θ_v

| Piezómetro No: | d_a (g/cm³) promedio | Porosidad (%) promedio | Θ_m (%) promedio | Θ_v (%) promedio |
|-----------------------|---|-------------------------------|---|---|
| PA-1 | 0.49 | 81.6 | 152.2 | 70.8 |
| PA-4 | 0.17 | 93.7 | 515.9 | 85.8 |
| PA-5 | 0.12 | 95.4 | 800.5 | 97.4 |
| PA-7 | 0.66 | 75.3 | 113.3 | 73.1 |
| PA-8 | 0.38 | 85.8 | 238.4 | 88.2 |
| PA-9 | 0.45 | 83.1 | 182.5 | 77.1 |

La siguiente figura resume las diferentes características que pueden encontrarse en dos distintos suelos de bofedal, como es la longitud de las raíces o biomasa subterránea, su

disposición o tipo, el sedimento que lo acompaña y las distintas especies dominantes que los conforman (figura 10).

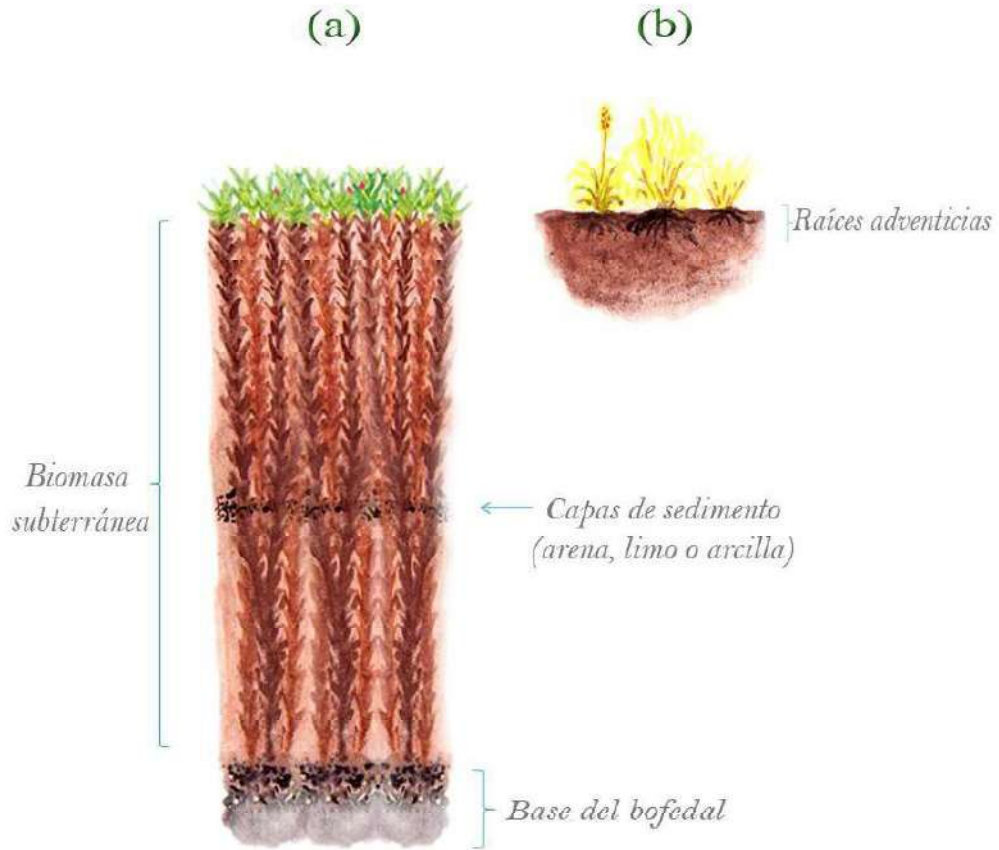


Figura 10. Perfil esquematizado de un suelo de bofedal con dominancia de juncáceas (a) y dominancia de gramíneas (b).

La figura 11 muestra la biomasa subterránea o el tipo de raíces de algunas especies, principalmente las dominantes, que se encontraron en los bofedales estudiados.

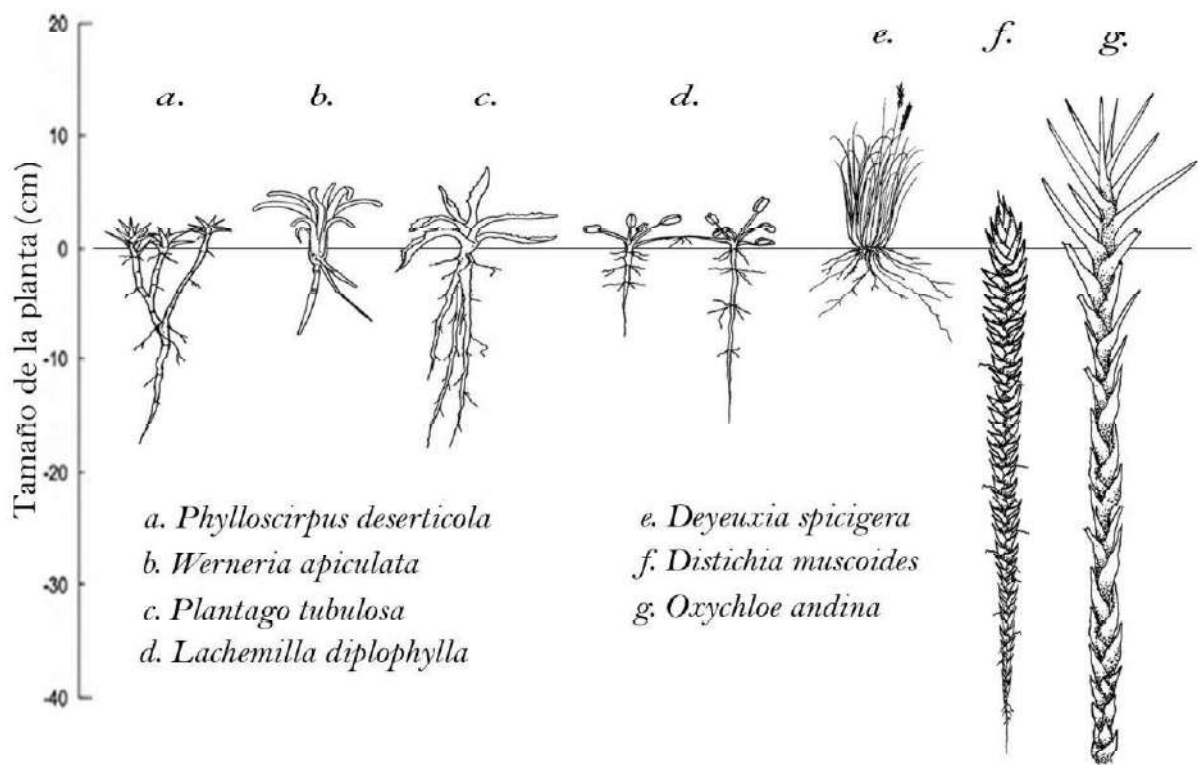


Figura 11. Tipo y profundidad de las diversas especies presentes en los bofedales. *Distichia* y *Oxychloe* pueden alcanzar profundidades aún mayores según los datos y observaciones.

Por último, el contenido de agua en el suelo superficial (primeros 20 cm), aun teniendo distinto tipo de vegetación dominante, es muy similar en ambos bofedales (figura 12). Las únicas diferencias observadas resultan en las muestras obtenidas en mayo de 2013 (PA2 = 67% y PA3 = 73%) que bajaron la media con un menor contenido de humedad, ya que fueron colectadas a inicios de la época seca, cuando el bofedal empieza a perder su característico color verde y muchos ojos de agua comienzan a secarse (figura 13). El contenido de agua en la muestra de suelo obtenida a una profundidad de 1.4 m en Aynacha Pacoco en cambio es levemente inferior, tal vez por el paulatino aumento en el porcentaje de sedimentos y una disminución de la materia orgánica conforme aumenta la profundidad.

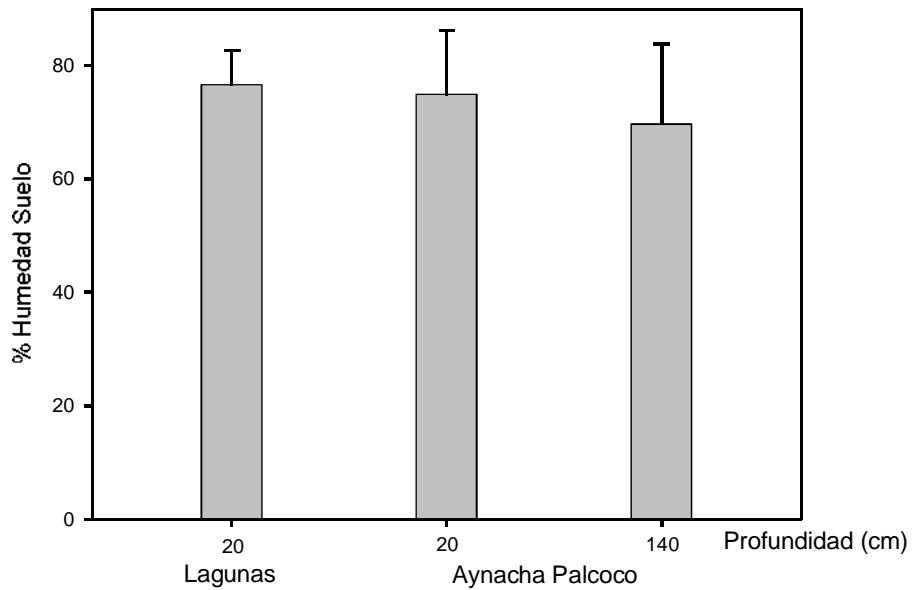


Figura 12. Porcentaje de agua en suelo superficial y a 1.4 m de profundidad, en los bofedales de Lagunas y Aynacha Pacoco.



Figura 13. Bofedal de Aynacha Pacoco, en mayo de 2013.

Profundidad del bofedal

Las medidas que se hicieron con las varillas metálicas de adición continua muestran una profundidad que fluctúa entre los 0.81m en inmediaciones al piezómetro 1 de Aychuta, hasta

profundidades mayores a los 6.12 m en los piezómetros 5 y 8 de Aynacha Pacoco (figura 14b).

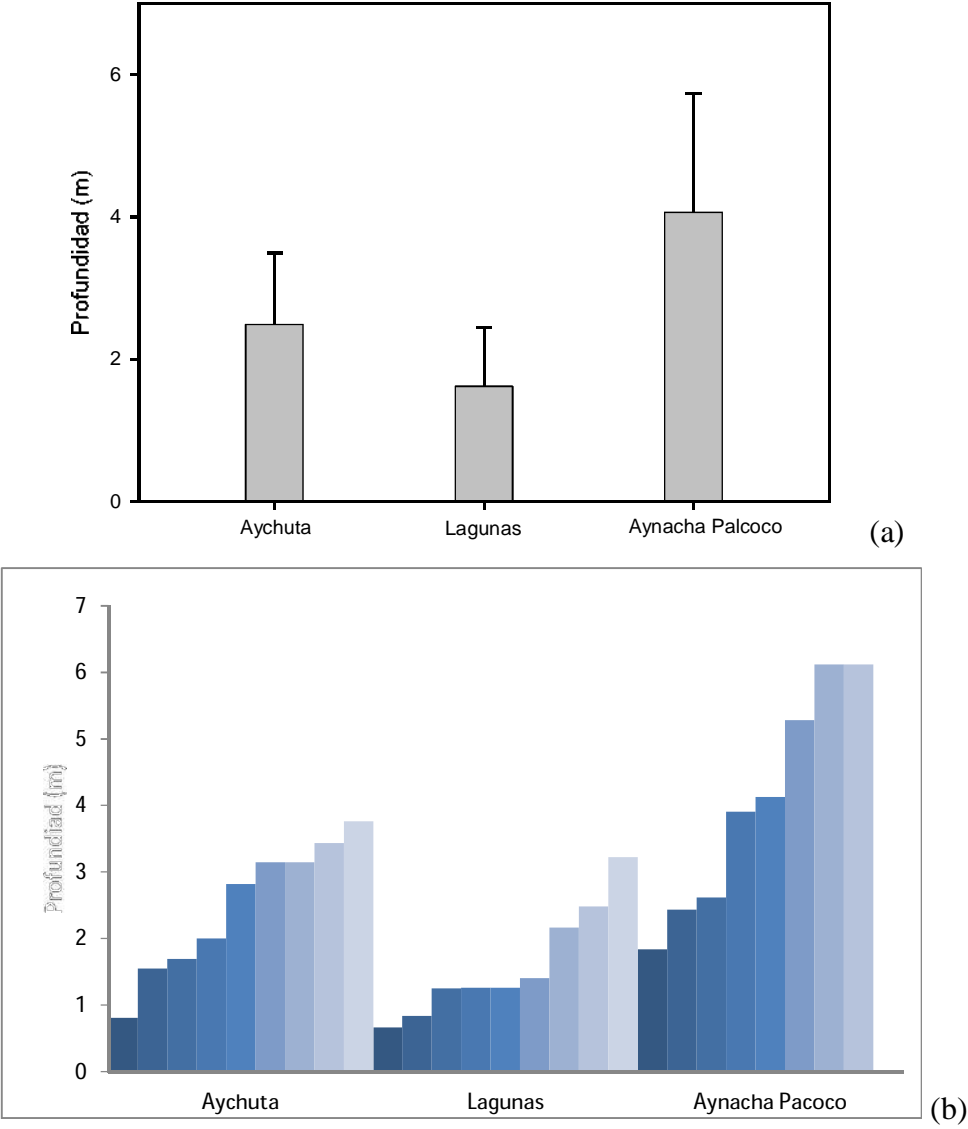


Figura 14. Profundidad de los bofedales en cercanías a los piezómetros de monitoreo. (a) Valores promedios con DS y (b) Valores de cada piezómetro ordenados de forma ascendente.

En Aynacha Pacoco se emplearon todas las varillas disponibles y aun así no se logró topár con la base del bofedal, así que la profundidad es mayor a los 6.12 m reportados en piezómetros 5 y 8.



Figura 15. Extracción de las varillas metálicas en Aynacha Pacoco.

Sondeos geoelectrónicos realizados por Rosmar Villegas (2012) determinaron que el bofedal de Aychuta tiene entre 4 a 7 niveles descritos según la presencia de algún tipo de sustrato (limo arenoso o arenas con algo de grava saturada, etc.) y culminando **todos en** “basamento rocoso”. Villegas concluye que en algunas áreas de sondeo la base del bofedal se encontraría a una profundidad media de 9 a 10 metros y en otras llegaría hasta 28 m.

Empleando las varillas metálicas esta variación es incluso mayor pues hay zonas en el bofedal que alcanzan muy poca profundidad, incluso menor a las registradas en áreas de borde, lo que da una idea de la heterogeneidad del bofedal.

Relaciones morfológicas de las especies dominantes con variables ambientales

El trabajo de Lorini (2012) en la microcuenca del río Sururía ha reportado un nivel piezométrico más elevado en el bofedal de Aychuta ($-23 \pm DE 12,2$ cm) en relación al bofedal de Lagunas ($-33,5 \pm DE 18,9$ cm). Si relacionamos los resultados promedio de las variables

medidas en este estudio (para esto asumiremos que el dato de Aychuta sería similar al de Aynacha Pacoco por su semejanza estructural y su similitud de especies), observamos tendencias positivas entre el nivel piezométrico del bofedal y el grosor promedio de las raíces dominantes, el porcentaje promedio de la materia orgánica en el suelo y la profundidad media del suelo en los bofedales (figura 16 a,b,c). Mientras que hay una leve tendencia negativa con el contenido porcentual de agua en el suelo superficial (figura 16d).

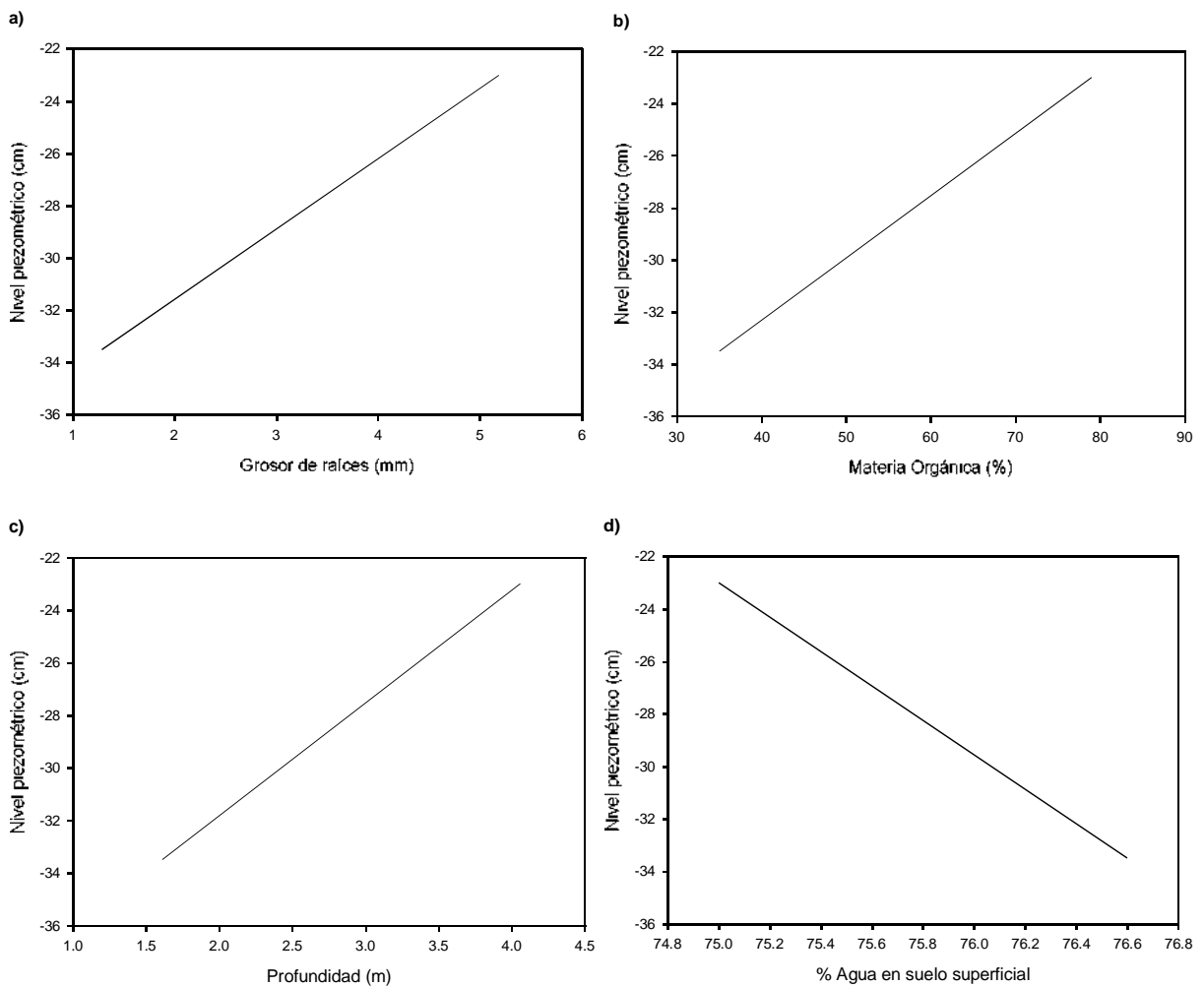


Figura 16. Se observan tendencias positivas entre el nivel piezométrico y el grosor de las raíces (a), el porcentaje de materia orgánica (b) y la profundidad promedio del bofedal (c). En cambio hay una tendencia negativa con el porcentaje de agua que se tiene al ras del suelo (d).

CONCLUSIONES

- La flora en los bofedales estudiados cuenta con 35 especies diferentes, lo que constituye alrededor del 10% de la diversidad florística del parque.
- Los bofedales de Aychuta y Aynacha Pacoco presentan juncáceas (*Oxychloe andina* y *Distichia muscoides*) como los elementos de mayor dominancia.
- El bofedal de Lagunas tiene una elevada equitatividad con especies de gramíneas, rosáceas, asteráceas, plantagináceas y ciperáceas, lo cual señala una elevada influencia de la vegetación de puna.
- Alrededor del 30% de especies con compartidas entre los tres bofedales estudiados.
- Las adaptaciones morfológicas (longitud y grosor de la biomasa subterránea) de las juncáceas *Oxychloe andina* y *Distichia muscoides*, tienen una tendencia positiva con el nivel piezométrico medio de los bofedales.
- La dominancia elevada de *Oxychloe andina* en los bofedales de Aychuta y Aynacha Pacoco se correlaciona con una profundidad elevada del suelo del bofedal debido a su forma de crecimiento característico.
- El suelo en los bofedales dominados por juncáceas se constituyen en importantes reservorios de carbono y materia orgánica, y a su vez son claves en la regulación del agua y la fertilidad de los suelos.
- Las características físicas y estructurales de los suelos en bofedales están fuertemente determinadas por las extremas condiciones climáticas del lugar, mismas que favorecen la acumulación y lenta descomposición de materia orgánica.
- El elevado porcentaje de materia orgánica en suelos de bofedal aumenta la capacidad de retención hídrica en sus espacios porosos y parece tener una relación positiva con el nivel piezométrico medido.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue posible gracias a *Agua Sustentable* y su interés por comprender las relaciones hídricas y biológicas en los bofedales del Parque Nacional Sajama. En este sentido quiero

expresar mi profundo agradecimiento a Horacio Lorini por la invitación a realizar este trabajo y por la guía en la elaboración del proyecto, a Alejandra Domic por sus valiosos comentarios para estructurar el estudio, al Herbario Nacional de Bolivia e Isabel Gómez por el préstamo de material para el trabajo de campo, y por la colaboración desinteresado en terreno a Matheuw, don Víctor, Ing. Ramón Ramos y particularmente a Ariel Lliully quien además realizó la identificación de varias gramíneas.

LITERATURA CITADA

- Beck, S., Domic, A. I., García, C., Meneses, R. I., Yager K. & S. Halloy. 2010. El Parque Nacional Sajama y sus plantas. Fundación PUMA & Conservación Internacional, La Paz.
- Domic, A. 2005. Influencia de los factores climáticos en el crecimiento radial de la keñua (*Polylepis tarapacana*) en el Parque Nacional Sajama, Bolivia. Tesis de Licenciatura, FCPN-UMSA, Carrera de Biología. La Paz-Bolivia. Pp. 140.
- Earle, L. R., Warner B. G. & R. Aravena. 2003. Rapid development of an unusual peat-accumulating ecosystem in the Chilean Altiplano. *Quaternary Research* 59: 2-11.
- Estensoro, S. 1991. Los bofedales de la cuenca alta del valle de La Paz. En: Forno, E. & M. Baudoin. *Historia Natural de un valle en Los Andes: La Paz*. Instituto de Ecología. La Paz-Bolivia. pp. 109-121.
- Feinsinger, P. 2003. El diseño de estudios de campo para la conservación de la biodiversidad. Editorial FAN, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.
- Ibisch, P.L., Beck, S.G., Gerkmann, B. & A. Carretero. 2003. Ecoregiones y ecosistemas. En: Ibisch, P.L. & G. Mérida (eds.) *Biodiversidad: la riqueza de Bolivia*. Estado de conocimiento y conservación. FAN, Santa Cruz. Pp 47-88.
- Llambi, L.D., Soto, A., Célleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B. & P. Borja. 2012. Ecología, hidrología y suelos de páramos. Proyecto Páramo Andino. CONDESAN. Pp. 294.
- Lorini, H. 2012. Cambio climático y relaciones hídricas en bofedales y pajonales de un valle glacial del Parque Nacional Sajama. Informe Final de Consultoría para Agua Sustentable, dentro del proyecto “Adaptación al cambio climático en comunidades andinas bolivianas que dependen de glaciares tropicales”. Pp. 41.
- McNaughton, S.J., Banyikwa, F.F. & MM. McNaughton. 1998. Root biomass and productivity in a grazing ecosystem: the Serengeti. *Ecology*, 79, 587–592.
- Matteucci, S.D. & A. Colma. 1982. Metodología para el estudio de la vegetación. Secretaría General de la Organización de Estados Americanos. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. Washington DC. pp. 168.
- Pacheco, M. A. 1998. Aprovechamiento de áreas hidromórficas en el altiplano peruano-boliviano. Manejo de bofedales. Cría de alpacas. Cooperación Andina de Fomento y Autoridad Binacional del Lago Titicaca, La Paz.

- Ribera, M.O. & M. Liberman. 2006. El uso de la tierra y los recursos de la biodiversidad en las áreas protegidas de Bolivia. Un análisis crítico con propuestas para su conservación y manejo sostenible. SERNAP – GEF II. La Paz – Bolivia. Pp. 520.
- Ruthsatz, B. 2012. Vegetación y ecología de los bofedales altoandinos de Bolivia. *Phytocoenologia*, 42 (3-4), 133-179.
- Spehn, E., Liberman, M. & Ch. Körner (eds.). 2006. Land use change and mountain biodiversity. Taylor & Francis Group, Boca Ratón.
- Squeo, F., Warner, B., Aravena R. & D. Espinoza. 2006. Bofedales: high altitude peat lands of the central Andes. *Revista Chilena de Historia Natural* 79: 245-255.
- Titlyanova, A.A., Romanova, I.P. & N.P. Kosykh. 1999. Pattern and process in above-ground and below-ground components of grassland ecosystems. *Journal of Vegetation Science*, 10, 307–320.
- Vogt, K.A., Vogt, D.J. & P.A. Palmiotto. 1996. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. *Plant and Soil*, 187, 159–219.
- Zavala, H. & J. Cepeda. 2006. Caudales ecológicos en vegas altoandinas: un estudio de caso. En: *Geoecología de los Andes desérticos. La Alta Montaña del Valle del Elqui*. La Serena. Pp: 525-551.

ANEXOS

Algunos ejemplos de las especies encontradas en los bofedales estudiados.

1. Cojines de *Oxychloe andina*, o pak'o macho con frutos comestibles. 2. Flor de *Lobelia oligophylla* en medio de un cojín de *Distichia muscoides*. 3. Flor de *Lachemilla diplophylla*. 4. Flor de *Arenaria* sp. 5. Flores de *Gentiana sedifolia*. 6. Inflorescencia de *Myrosmodes paludosa*.

