

Variation in moss biomass as an effect of the use and management of sites in a forest of *Abies religiosa* (Kunth) Cham. & Schtdl. in Mexico

Variación de la biomasa de musgos como efecto del uso y manejo de sitios en un bosque de *Abies religiosa* (Kunth) Cham. & Schtdl. en México

Jaydine Pen¹; Arturo Sánchez-González^{1*};
José F. Juárez-López¹; Claudio A. Hernández-Becerra²

¹Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Centro de Investigaciones Biológicas, Laboratorio de Ecología de Poblaciones. Ciudad del Conocimiento, km 4.5 carretera Pachuca-Tulancingo. C. P. 42184. Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

²Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Parque Nacional El Chico. Carretera Casas Quemadas-Mineral del Chico km 7.5. C. P. 42120. Mineral del Chico, Hidalgo, México.

*Corresponding author: arturosg@uaeh.edu.mx; tel.: +52 771 7172000 ext. 6676.

Abstract

Introduction: Mosses are pioneer organisms known for their high-water storage capacity and biomass. Consequently, they play a significant structural and functional role in terrestrial ecosystems.

Objective: The aim of the present study was to analyze whether there is variation in moss biomass and water storage capacity among moss species because of site use and management in a fir forest at Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México

Materials and methods: A total of ten sites were selected, distributed across an altitudinal range of 2781 to 2981 m: three in the core zone of the park, three in the buffer zone (tourism without moss extraction), and four in the zone with moss extraction. Plots and subplots were established at each site to estimate the biomass and water storage capacity (WSC) of moss species. Furthermore, the coverage of the herbaceous and shrub strata at the sites was determined.

Results and discussion: *Thuidium delicatulum* (Hedw.) Schimp. var. *delicatulum* predominated in biomass across all sites. The highest moss biomass (0.140 g·cm⁻²) was found in an extraction site (Esquillero), while the highest Water Storage Capacity (WSC) (0.254 g·cm⁻²) was estimated in ecotourism-oriented sites (La Orozca). In sites with moss extraction, coverage of the herbaceous and shrub strata was minimal, and moss biomass increased.

Conclusions: Use (conservation, ecotourism) and management (extraction) of the forest affects the biomass and WSC values of mosses and the percentage of understory cover (herbaceous and shrubs).

Keywords: bryophytes; moss extraction; fir forest; Parque Nacional El Chico; *Thuidium delicatulum*.

Resumen

Introducción: Los musgos son organismos pioneros caracterizados por su alta capacidad de almacenamiento de agua y biomasa, por lo que desempeñan un papel estructural y funcional importante en los ecosistemas terrestres.

Objetivo: Analizar si existe variación en la biomasa y capacidad de almacenamiento de agua en las especies de musgos como efecto del uso y manejo de sitios en un bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México

Materiales y métodos: Se seleccionaron 10 sitios distribuidos en un intervalo altitudinal de 2781 a 2981 m: tres en la zona núcleo del parque, tres en la zona de amortiguamiento (turismo sin extracción de musgo) y cuatro en la zona con extracción de musgo. En cada sitio se establecieron parcelas y subparcelas para estimar la biomasa y capacidad de almacenamiento de agua (CAA) de las especies de musgos. Asimismo, se determinó la cobertura del estrato herbáceo y arbustivo de los sitios.

Resultados y discusión: En todos los sitios predominó por biomasa *Thuidium delicatulum* (Hedw.) Schimp. var. *delicatulum*. La biomasa más alta de musgos (0.140 g·cm⁻²) se encontró en un sitio de extracción (Esquillero), mientras que la mayor CAA (0.254 g·cm⁻²) se estimó en sitios destinados al ecoturismo (La Orozca). En los sitios con extracción de musgos, la cobertura de los estratos herbáceo y arbustivo fue escasa y la biomasa muscinal incrementó.

Conclusiones: El uso (conservación, ecoturismo) y manejo (extracción) del bosque afecta los valores de biomasa y CAA de los musgos y el porcentaje de cobertura del sotobosque (herbáceas y arbustos).

Palabras clave: briofitas; extracción de musgo; oyamel; Parque Nacional El Chico; *Thuidium delicatulum*.

Introduction

Bryophytes (hornworts, liverworts, and mosses) constitute the second most diverse group of plants, comprising approximately 13 000 species (Goffinet et al., 2008). Since they lack effective mechanisms for water content regulation (poikilohydry), environments suitable to their development and reproduction are those that are humid, with moderate temperatures and indirect exposure to sunlight (Vanderpoorten & Goffinet, 2009).

Bryophytes play an important role in maintaining moisture in terrestrial ecosystems, since they can store a high volume of water, about 50 % of the total intercepted rainwater (Delgadillo-Moya, 2014; Vanderpoorten & Goffinet, 2009). Mosses, especially, contribute significantly to plant biomass in several ecosystems; moreover, they are pioneer organisms, because they favor soil formation and water retention in the system.

Mosses are highly sensitive to changes in environmental conditions, which is related to their anatomical (e.g., poorly differentiated tissues and one-cell-thick phyllids) and physiological (poikilohydria) characteristics. Climate change and disturbance (e.g. deforestation, fragmentation and land use change) can affect the abundance and distribution of mosses, because increased temperature favors water loss by evapotranspiration, which decreases metabolic activity and causes tissue damage (Oishi, 2018; Siwach et al., 2021; Toro Manriquez et al., 2020).

Regarding direct uses, mosses are used for air pollution monitoring, because they absorb particles and chemical compounds from the atmosphere that they store in their tissues (Siwach et al., 2021). Additionally, these bryophytes serve as a non-timber forest resource of economic importance in Mexico, especially during the Christmas season (Acatitla Pluma et al., 2020); however, the intensive extraction and sale of mosses prevent the regeneration of their populations and cause environmental deterioration of the soil and forest, which could represent a risk for the survival of these species (Anastacio Martínez et al., 2017; Hernández-Rodríguez & Delgadillo-Moya, 2021).

Delgadillo-Moya (2014) mentions that information on floristic diversity, ecological importance and potential uses of mosses in Mexico is still scarce. In the particular case of the state of Hidalgo, there have been some studies focused on the richness and distribution of this group of plants, but most of the territory has not been explored (Delgadillo et al., 2014). The present research had the following objectives: 1) to analyze whether there is variation in the biomass and water storage

Introducción

Las briofitas (antoceros, hepáticas y musgos) conforman el segundo grupo más diverso de plantas, con aproximadamente 13 000 especies (Goffinet et al., 2008). Debido a que estas no poseen mecanismos para la regulación eficaz del contenido de agua (poiquilohidria), los ambientes más adecuados para su desarrollo y reproducción son húmedos con temperatura moderada y con exposición indirecta a la luz solar (Vanderpoorten & Goffinet, 2009).

Las briofitas cumplen un papel importante en el mantenimiento de la humedad en los ecosistemas terrestres, dado que pueden almacenar un volumen alto de agua, cerca de 50 % del total de agua de lluvia interceptada (Delgadillo-Moya, 2014; Vanderpoorten & Goffinet, 2009). Los musgos, en particular, contribuyen de manera significativa a la biomasa vegetal en varios ecosistemas; además, son organismos pioneros, porque favorecen la formación de suelo y la retención de agua en el sistema.

Los musgos poseen alta sensibilidad a cambios en las condiciones ambientales, lo cual se relaciona con sus características anatómicas (v. g. tejidos poco diferenciados y filidios de una célula de grosor) y fisiológicas (poiquilohidria). El cambio climático y el disturbio (v. g. deforestación, fragmentación y cambio de uso del suelo) pueden afectar la abundancia y distribución de los musgos, porque el incremento en la temperatura favorece la pérdida de agua por evapotranspiración, lo cual disminuye la actividad metabólica y provoca daño en los tejidos (Oishi, 2018; Siwach et al., 2021; Toro Manriquez et al., 2020).

Con respecto a los usos directos, los musgos son utilizados para el monitoreo de la contaminación del aire, debido a que absorben partículas y compuestos químicos de la atmósfera que almacenan en sus tejidos (Siwach et al., 2021). Asimismo, estas briofitas constituyen un recurso forestal no maderable de importancia económica en México, en especial durante la temporada navideña (Acatitla Pluma et al., 2020); sin embargo, la extracción y venta intensiva de los musgos impiden la regeneración de sus poblaciones y ocasionan deterioro ambiental del suelo y del bosque, lo cual podría representar un riesgo para la supervivencia de estos (Anastacio Martínez et al., 2017; Hernández-Rodríguez & Delgadillo-Moya, 2021).

Delgadillo-Moya (2014) menciona que la información sobre la diversidad florística, importancia ecológica y usos potenciales de los musgos en México todavía es escasa. En el caso particular del estado de Hidalgo se han realizado algunos estudios enfocados a conocer la riqueza y distribución de este grupo de plantas, pero la mayor parte del territorio no ha sido explorado (Delgadillo et al., 2014).

capacity of moss species in sites for conservation, ecotourism and extraction in the oyamel fir forest of Parque Nacional El Chico, Hidalgo, Mexico, and 2) to estimate whether the coverage of the herbaceous and shrub stratum differs between sites according to the conditions of use. The aforementioned to provide information on the effect of moss extraction in this oyamel fir forest.

Materials and Methods

Study area

The Parque Nacional El Chico (PNC) is located in the Sierra de Pachuca, within the Transmexican Volcanic Belt. The predominant climate in the area is C(m)(w)b(i)gw"; that is, temperate subhumid with summer rainfall, mean annual temperature between 12 and 18 °C and total annual precipitation of 1479.5 mm (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP], 2005; Razo-Zárate et al., 2013). The dominant vegetation in the PNC consists of temperate sub-humid forests of *Abies* (62.9 %), *Quercus-Abies* (10.55 %), *Juniperus* (4.67 %), *Quercus* (3.97 %), *Abies-Quercus* (3.93 %), *Quercus-Pinus* (2.25 %), *Pinus* (1.87 %), *Cupressus* (1.16 %) and *Pinus-Quercus* (0.87 %); in addition, there is secondary grassland-scrub (2.18 %) and, in the rest of the area, aquatic, ruderal and arvense, rupicolous and xerophytic vegetation. In general, these vegetation types develop among numerous rocky formations, small valleys, lagoons and rivers (CONANP, 2005).

Moss sampling sites and units

Sampling sites in the oyamel fir forest of the PNC, dominated by *Abies religiosa* (Kunth) Cham. & Schltdl., were chosen based on the following criteria: 1) three sites without moss extraction, located in the core zone (CZ), 2) three sites without moss extraction, but with ecotourism activities (adjacent to the CZ) and 3) four sites where moss extraction is allowed (in the periphery of the PNC). The sampling sites are distributed in an altitudinal range between 2780 and 2900 m (Figure 1).

At each sampling site, two 10 m x 10 m plots were established randomly, separated by a distance of 10 to 15 m from each other, according to the BRYOLAT methodology (Gabriel et al., 2014). Each plot was divided into 25 squares (2 m x 2 m), to subsequently select three of them at random. Each square was divided into micro squares of 5 cm x 5 cm, to carry out the sampling in three of them randomly selected. Therefore, sampling was performed in 18 microplots at each site: one site, two plots, three squares per plot, three microplots per square, i. e. $1 \times 2 \times 3 \times 3 = 18$.

En la presente investigación se plantearon los siguientes objetivos: 1) analizar si existe variación en la biomasa y capacidad de almacenamiento de agua en las especies de musgos de sitios destinados a la conservación, ecoturismo y extracción en el bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México y, 2) estimar si la cobertura del estrato herbáceo y arbustivo difiere entre los sitios de acuerdo con las condiciones de uso. Lo anterior con la finalidad de aportar información sobre el efecto de la extracción de los musgos en este bosque de oyamel.

Materiales y métodos

Área de estudio

El Parque Nacional El Chico (PNC) se encuentra en la Sierra de Pachuca, dentro de la Faja Volcánica Transmexicana. El clima que predomina en el área es C(m)(w)b(i)gw"; es decir, templado subhúmedo con lluvias en verano, con temperatura media anual entre 12 y 18 °C y precipitación total anual de 1479.5 mm (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP], 2005; Razo-Zárate et al., 2013). La vegetación dominante en el PNC está conformada por bosques templados subhúmedos de *Abies* (62.9 %), *Quercus-Abies* (10.55 %), *Juniperus* (4.67 %), *Quercus* (3.97 %), *Abies-Quercus* (3.93 %), *Quercus-Pinus* (2.25 %), *Pinus* (1.87 %), *Cupressus* (1.16 %) y *Pinus-Quercus* (0.87 %); además, se encuentra pastizal-matorral secundario (2.18 %) y, en el resto del área, vegetación acuática, ruderal y arvense, rupícola y xerófila. Los tipos de vegetación mencionados se desarrollan, en general, entre numerosas formaciones rocosas, pequeños valles, lagunas y ríos (CONANP, 2005).

Sitios y unidades de muestreo de musgos

Los sitios de muestreo en el bosque de oyamel del PNC, dominado por *Abies religiosa* (Kunth) Cham. & Schltdl., se eligieron con base en los criterios siguientes: 1) tres sitios sin extracción de musgos, localizados en la zona núcleo (ZN), 2) tres sitios sin extracción de musgo, pero con actividades de ecoturismo (aledaños a la ZN) y 3) cuatro sitios donde se permite la extracción de musgos (en la periferia del PNC). Los sitios de muestreo se distribuyen en un intervalo de altitud de entre 2780 y 2900 m (Figura 1).

En cada sitio de muestreo se establecieron dos parcelas de 10 m x 10 m al azar, separadas por una distancia de 10 a 15 m entre sí, de acuerdo con la metodología BRYOLAT (Gabriel et al., 2014). Cada parcela se dividió en 25 cuadros de 2 m x 2 m, para posteriormente seleccionar tres de ellos al azar. Cada cuadro se dividió en microcuadros de 5 cm x 5 cm, para realizar el muestreo en tres de ellos seleccionados al azar. Por lo tanto, el muestreo se realizó en 18 microparcels en cada sitio: un sitio, dos parcelas, tres cuadros por parcela, tres microparcels por cuadro; es decir $1 \times 2 \times 3 \times 3 = 18$.

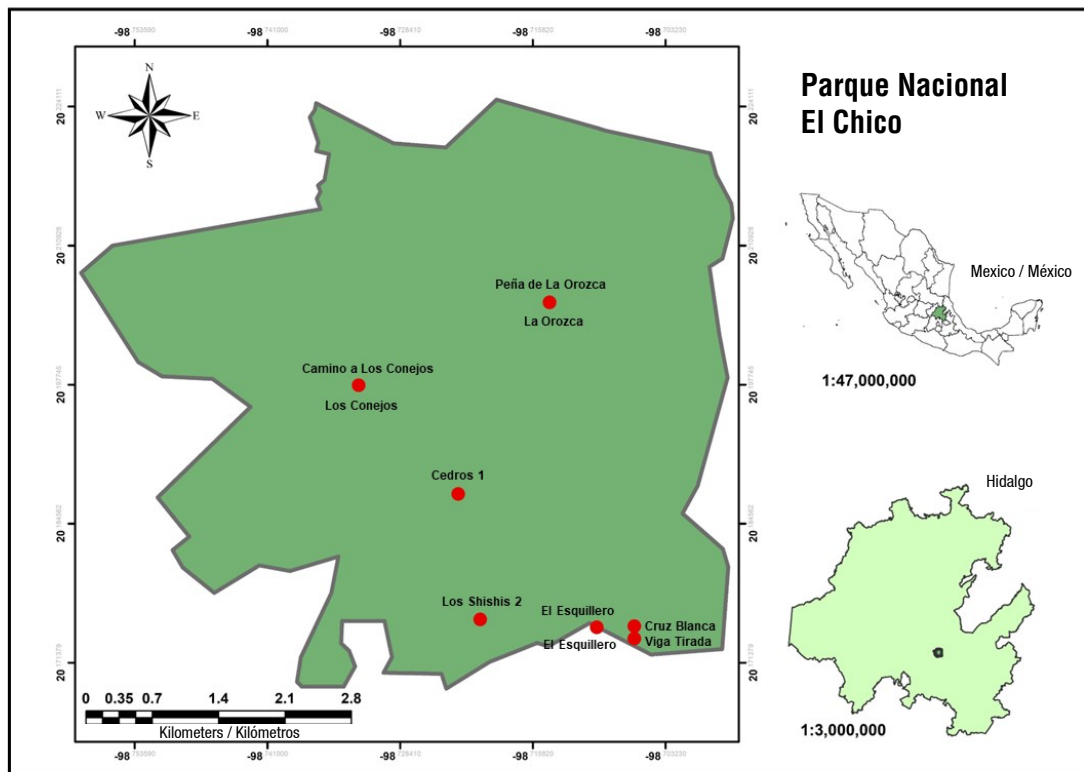


Figure 1. Location of the sampling sites, within (core zone) and on the periphery (ecotourism and moss extraction zone) of Parque Nacional El Chico, Hidalgo, Mexico.

Figura 1. Localización de los sitios de muestreo, dentro (zona núcleo) y en la periferia (zona de ecoturismo y extracción de musgos) del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México.

Estimation of biomass and water storage capacity

Biomass and water storage capacity (WSC) of mosses were estimated in the following order: (1) separation of samples per site, (2) determination of the species present in each sample, (3) estimation of dry weight or biomass (DB), for which samples were placed on newspaper and allowed to dry for one week at room temperature, and (4) estimation of saturated or wet biomass or weight (WB), for which samples were hydrated for 30 minutes and placed in a mesh for one hour in order to preserve their integrity and remove excess water by runoff (Oishi, 2018). Weights were determined using a triple beam balance or an analytical balance, according to the amount of biomass. The WSC of the species/samples was determined using the formula described by Oishi (2018): $WSC (g \cdot 100 \text{ cm}^{-2}) = WB - DB$.

Coverage of the herbaceous and shrub strata

In each locality, two randomly selected plots measuring 10 m x 10 m were established to determine the percentage of coverage for the herbaceous and shrub strata, following the scale proposed by Braun-Blanquet

Estimación de biomasa y capacidad de almacenamiento de agua

La biomasa y la capacidad de almacenamiento de agua (CAA) de los musgos se estimaron en el siguiente orden: (1) separación de muestras por sitio, (2) determinación de las especies presentes en cada muestra, (3) estimación del peso o biomasa en seco (BS), para ello las muestras se colocaron sobre periódico y se dejaron secar por una semana a la temperatura ambiente del laboratorio, y (4) estimación de la biomasa o peso saturado o en húmedo (BH), para lo cual las muestras se hidrataron por 30 minutos y se colocaron en una malla durante una hora con el fin de preservar su integridad y eliminar el exceso de agua por escurrimiento (Oishi, 2018). Los pesos se determinaron usando una balanza granataria o una balanza analítica, de acuerdo con la cantidad de biomasa. La CAA de las especies/muestras se determinó con la fórmula descrita por Oishi (2018): $CAA (g \cdot 100 \text{ cm}^{-2}) = BH - BS$.

Cobertura de los estratos herbáceo y arbustivo

En cada localidad se establecieron dos parcelas de 10 m x 10 m al azar, para definir el porcentaje de cobertura de los estratos herbáceo y arbustivo, de acuerdo con la

(Mueller-Dombois & Ellenberg, 1974), modified by Mejía Canales et al. (2018). In this scale, 5 = 75 to 100 %, 4 = 50 to 74.9 %, 3 = 25 to 49.9 %, 2 = 10 to 24.9 %, and 1 = less than 9.9 %. For this purpose, a visual estimation was made of the approximate percentage of the total ground area covered by the herbaceous or shrub stratum, without taking into account the overlap between individuals (Fehmi, 2010) or the taxonomic identity of species in both strata. The coverage percentages of the two plots in each locality were averaged to obtain a single value on the Braun-Blanquet scale.

Tree canopy cover

Tree canopy cover was estimated using a convex spherical densiometer. For this purpose, five measurements were made in each sampling plot (two per site), in each corner and in the central part; in each position the canopy cover was estimated considering the four cardinal points, as indicated in the manual of use of the densiometer (Lemmon, 1956). From these 10 measurements (five for each plot), the average canopy coverage per sampling site was calculated. The results were considered an indirect measure of the amount of light that moss species receive in the forest (Baudry et al., 2014).

Identifying species

Moss specimens were identified to family and genus level using the taxonomic keys of Gradstein et al. (2001) and to species level using the keys of Sharp et al. (1994). The nomenclature of species and taxonomic authors was updated based on information from the WFO project website (2023).

Data analysis

The values of dry biomass, wet biomass, and water storage capacity per sampling site showed no normal distribution. Therefore, the data obtained for each sampling site were compared using the non-parametric Mann-Whitney test. This test compares two independent samples (pairs of sampling sites) when the data are not normally distributed, generating a test statistic *U* and a *P*-value, which are used to determine whether the two groups (pairs of sampling sites) are significantly different. The analysis was conducted using the PAST software version 4.03 (Hammer et al., 2001), which automatically estimates a Bonferroni adjustment or correction of the *P*-value based on the number of comparisons made between sites independently. This is done to avoid errors in the interpretation of the results (Matamoros & Ceballos, 2017).

escala propuesta por Braun-Blanquet (Mueller-Dombois & Ellenberg, 1974), modificada por Mejía Canales et al. (2018); donde, 5 = 75 a 100 %, 4 = 50 a 74.9 %, 3 = 25 a 49.9 %, 2 = 10 a 24.9 % y 1 = menos de 9.9 %. Para ello, de manera visual, se estimó el porcentaje aproximado del área total del suelo, que estaba oculto por la cobertura del estrato herbáceo o arbustivo, sin considerar la superposición entre individuos (Fehmi, 2010) ni la identidad taxonómica de las especies en ambos estratos. Los porcentajes de cobertura de las dos parcelas de cada localidad se promediaron para obtener un solo valor en la escala de Braun-Blanquet.

Cobertura del dosel

La cobertura del dosel se estimó con un densiómetro esférico convexo. Para ello, en cada parcela de muestreo (dos por sitio) se hicieron cinco mediciones (en cada esquina y en la parte central); en cada posición se estimó la cobertura considerando los cuatro puntos cardinales, como se indica en el manual de uso del densiómetro (Lemmon, 1956). A partir de estas 10 mediciones (cinco por cada parcela) se calculó la cobertura promedio por sitio de muestreo. Los resultados se consideraron una medida indirecta de la cantidad de luz que las especies de musgos reciben en el bosque (Baudry et al., 2014).

Identificación de especies

En la identificación de los ejemplares de musgos a nivel de familia y género se utilizaron las claves taxonómicas de Gradstein et al. (2001) y, a nivel de especie, con las claves de Sharp et al. (1994). La nomenclatura de las especies y de los autores taxonómicos se actualizó con base en la información de la página electrónica del proyecto WFO (2023).

Análisis de datos

Los valores de biomasa seca, biomasa húmeda y capacidad de almacenamiento de agua por sitio de muestreo no presentaron distribución normal, por lo que los datos obtenidos para cada sitio de muestreo se contrastaron entre sí, mediante la prueba no paramétrica Mann-Whitney. Esta prueba compara dos muestras independientes (pares de sitios de muestreo) cuando los datos no están normalmente distribuidos y genera un estadístico de prueba *U* y un valor *P*, que se utilizan para definir si los dos grupos (pares de sitios de muestreo) son significativamente diferentes. El análisis se realizó con el programa de cálculo PAST versión 4.03 (Hammer et al., 2001) que estima de forma automática un ajuste o corrección de Bonferroni del valor *P*, con base en el número de comparaciones realizadas entre sitios de forma independiente, para evitar errores en la interpretación de los resultados (Matamoros & Ceballos, 2017).

Results

Moss species with the highest biomass in the oyamel fir forest

We identified five species of mosses with structural importance in the 10 sampling sites, but *Thuidium delicatulum* (Hedw.) Schimp. var. *delicatulum* had the highest biomass values. Two other varieties were determined in this species: *Thuidium delicatulum* var. *peruvianum* and *T. delicatulum* var. *radicans*, but they showed low biomass values. The other most representative moss species in terms of biomass value were *Bryum argenteum* Hedw., *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid., *Cyrtiohypnum mexicanum* (Mitt.) W. R. Buck & H. A. Crum and *Helicodontium capillare* (Hedw.) A. Jaeger (Table 1). The general characteristics of the identified species and varieties with data on their habitat (vegetation type), altitude, climate and geographic distribution are described in Annex 1.

Water storage capacity, wet biomass and dry biomass

Table 2 indicates that the species *T. delicatulum* var. *delicatulum* predominated widely over the others due to its presence and structural values: dry biomass, wet biomass, and WSC (water storage capacity). Figure 2 shows the results of the Mann-Whitney test, which indicates that dry biomass, wet biomass, and WSC of the mosses vary significantly ($P < 0.05$) among most of the analyzed sites. The core zone sites (A, B, and C) were similar to each other in the three analyzed variables but had lower values of biomass and WSC than most of the sampling sites in the ecotourism zones (E and

Resultados

Especies de musgos con mayor biomasa en el bosque de oyamel

Se identificaron cinco especies de musgos con importancia estructural en los 10 sitios de muestreo, pero *Thuidium delicatulum* (Hedw.) Schimp. var. *delicatulum* tuvo los valores más altos de biomasa. Se determinaron otras dos variedades en esta especie: *Thuidium delicatulum* var. *peruvianum* y *T. delicatulum* var. *radicans*, pero presentaron valores bajos de biomasa. Las otras especies de musgos más representativas por sus valores de biomasa fueron *Bryum argenteum* Hedw., *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid., *Cyrtiohypnum mexicanum* (Mitt.) W. R. Buck & H. A. Crum y *Helicodontium capillare* (Hedw.) A. Jaeger (Cuadro 1). En el Anexo 1 se describen las características generales de las especies y variedades identificadas con datos sobre su hábitat (tipo de vegetación), altitud, clima y distribución geográfica.

Capacidad de almacenamiento de agua, biomasa húmeda y biomasa seca

El Cuadro 2 indica que la especie *T. delicatulum* var. *delicatulum* predominó ampliamente sobre las demás por su presencia y valores estructurales: biomasa seca, biomasa húmeda y CAA. La Figura 2 muestra los resultados de la prueba Mann-Whitney, los cuales señalan que la biomasa seca, biomasa húmeda y CAA de los musgos varían significativamente ($P < 0.05$) entre la mayoría de los sitios analizados. Los sitios de la zona núcleo (A, B y C) fueron semejantes entre sí en las tres variables analizadas, pero presentaron valores

Table 1. Record of moss species (1 = present, 0 = absent) according to sampling site: Core zone (A = Cedros, B = Los Shishis, C = Los Conejos), tourist zone (D = Camino hacia Conejos, E = Peña de la Orozca, F = Orozca) and moss extraction zone (G = Esquillero, H = Esquillero, I = Cruz Blanca, J = Viga Tirada) in an *Abies religiosa* forest at Parque Nacional El Chico, Hidalgo.

Cuadro 1. Registro de las especies de musgos (1 = presente, 0 = ausente) de acuerdo con el sitio de muestreo: Zona núcleo (A = Cedros, B = Los Shishis, C = Los Conejos), zona turística (D = Camino Hacia Conejos, E = Peña de la Orozca, F = Orozca) y zona de extracción de musgo (G = Esquillero, H = Esquillero, I = Cruz Blanca, J = Viga Tirada) en un bosque de *Abies religiosa* en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo.

Species/Especie	Sampling sites/Sitios de muestreo									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
<i>Bryum argenteum</i> Hedw.	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
<i>Ceratodon purpureus</i> (Hedw.) Brid.	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Cyrtiohypnum mexicanum</i> (Mitt.) W. R. Buck & H. A. Crum	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
<i>Helicodontium capillare</i> (Hedw.) A. Jaeger	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Thuidium delicatulum</i> (Hedw.) Schimp. var. <i>delicatulum</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>T. delicatulum</i> var. <i>peruvianum</i> (Mitt.) H. A. Crum	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0
<i>T. delicatulum</i> var. <i>radicans</i> (Kindb.) H. A. Crum, Steere & L. E. Anderson	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Table 2. Record of dry biomass (DB), wet biomass (WB), wet biomass to dry biomass ratio (WB/DB) and water storage capacity (WSC) per moss species in an *Abies religiosa* forest at Parque Nacional El Chico, Hidalgo.

Cuadro 2. Registro de la aportación de biomasa seca (BS), biomasa húmeda (BH), proporción de biomasa húmeda con respecto a la biomasa seca (BH/BS) y capacidad de almacenamiento de agua (CAA) por especie de musgo en un bosque de *Abies religiosa* en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo.

Taxon/Taxón	DB/BS (g·cm ⁻²)	WB/BH (g·cm ⁻²)	WB/DB/BH/BS (%)	WSC/CAA (g·cm ⁻²)
<i>Bryum argenteum</i>	22.35	126.44	5.70	1.041
<i>Ceratodon purpureus</i>	24.70	124.08	5.00	0.994
<i>Cyrto-hypnum mexicanum</i>	35.20	185.61	5.30	1.503
<i>Helicodontium capillare</i>	5.60	34.33	6.10	0.287
<i>Thuidium delicatulum</i> var. <i>delicatulum</i>	585.12	4455.51	7.60	36.445
<i>T. delicatulum</i> var. <i>peruvianum</i>	35.46	170.31	4.80	1.349
<i>T. delicatulum</i> var. <i>radicans</i>	3.60	23.60	6.60	0.200

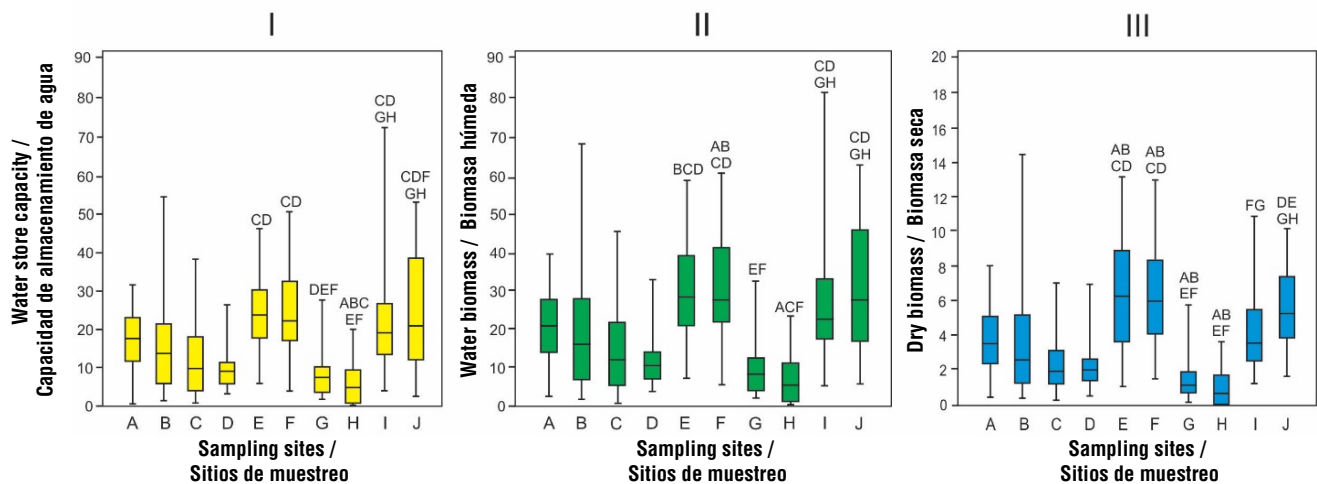


Figure 2. The Mann-Whitney test was conducted for I) water storage capacity (yellow color), II) wet biomass (green color), and III) dry biomass (blue color) of mosses identified in a forest of *Abies religiosa*. Whiskers indicate the maximum and minimum values of the variables at each site, and the vertical line within the boxes represents the median, indicating where 50 % of the data lies. The letters at the bottom of the figure (x-axis) represent the names of the sites: A: Cedros, B: Los Shishis. C: Los Conejos, D: Camino hacia Conejos, E: Peña Orozca, F: La Orozca, G: Esquillero 7, H: Esquillero 8, I: Cruz Blanca and J: Viga Tirada. Each site was compared with each of the other nine sites; the letters at the top of each box correspond to the sites that exhibited statistically significant differences ($P < 0.05$) when compared with the site positioned on the x-axis according to the Bonferroni test. For example, in the first graph, sites A, B, C, and D had no significant differences between them, so no letters are included at the top of the corresponding boxes. In contrast, sites E and F (x-axis) had significant differences compared to sites C and D.

Figura 2. Prueba de Mann Whitney para I) capacidad de almacenamiento de agua (color amarillo), II) biomasa húmeda (color verde) y III) biomasa seca (color azul) de los musgos identificados en un bosque de *Abies religiosa*. Los bigotes indican los valores máximos y mínimos de las variables en cada sitio y la línea vertical dentro de las cajas representa la mediana e indica donde se encuentran el 50 % de los datos. Las letras en la parte inferior de la figura (eje de las abscisas) representan los nombres de los sitios: A: Cedros, B: Los Shishis. C: Los Conejos, D: Camino hacia Conejos, E: Peña Orozca, F: La Orozca, G: Esquillero 7, H: Esquillero 8, I: Cruz Blanca y J: Viga Tirada. Cada sitio se contrastó con cada uno de los nueve sitios restantes; las letras en la parte superior de cada caja corresponden a los sitios con los cuales el sitio del eje de las abscisas tuvo diferencias estadísticamente significativas ($P < 0.05$) de acuerdo con la prueba de Bonferroni. Por ejemplo, en la primera gráfica, los sitios A, B, C y D no presentaron diferencias significativas entre sí, por lo que no se incluyen letras en la parte superior de las cajas correspondientes. En cambio, los sitios E y F (eje de las abscisas) sí mostraron diferencias significativas con respecto a los sitios C y D.

F) and moss extraction zones (I and J). Regarding the ecotourism zone sites (D, E, and F), only site D differed from the others in the three analyzed variables; however, they did show statistically significant differences ($P < 0.05$) compared to most of the core zone sites and moss extraction zone sites. On the other hand, the moss extraction sites (G, H, I, and J) differed from each other in the three analyzed variables; sites G and H with low values of dry biomass, wet biomass, and WSC differed significantly from sites I and J. When comparing the extraction zone sites with the core zone and ecotourism zone sites, it was observed that two of them (I and J) had significantly higher values in the three analyzed variables (Figure 2).

On the other hand, Table 3 indicates that the percentage of coverage of herbaceous and shrubby species, estimated using the Braun-Blanquet scale, differed among the sampling sites based on the type of disturbance or management (conservation, ecotourism, and moss extraction). The core zone and ecotourism sites at PNC exhibited well-developed herbaceous and shrubby layers (50 % or more coverage), but the shrubby layer was less prominent in the core zone (25 % or more coverage). In contrast, in the moss extraction zone sites, the coverage of both herbaceous and shrubby layers was low (25 % or less), leading to the forest floor being covered by plants with a creeping habit; specifically, mosses. It is important to mention that in all sampling sites, the dominant tree species was *A. religiosa*, and

más bajos de biomasa y CAA que la mayoría de los sitios de muestreo de las zonas de ecoturismo (E y F) y de extracción de musgos (I y J). Con respecto a los sitios de la zona de ecoturismo (D, E y F), solo el sitio D difirió de los demás en las tres variables analizadas; pero sí presentaron diferencias estadísticamente significativas ($P < 0.05$) con la mayoría de los sitios de la zona núcleo y de la zona de extracción de musgos. Por otra parte, los sitios con extracción de musgos (G, H, I y J) presentaron diferencias entre sí en las tres variables analizadas; los sitios G y H con valores bajos de biomasa seca, biomasa húmeda y CAA difirieron en forma significativa de los sitios I y J. Al comparar los sitios de la zona de extracción, con respecto a los de la zona núcleo y de ecoturismo, se observó que dos de ellos (I y J) tuvieron valores significativamente más altos en las tres variables analizadas (Figura 2).

Por otra parte, el Cuadro 3 indica que el porcentaje de cobertura de especies herbáceas y arbustivas, estimado con la escala Braun-Blanquet, difirió entre los sitios de muestreo de acuerdo con el tipo de perturbación o manejo (conservación, ecoturismo y extracción de musgos). Los sitios de la zona núcleo y de ecoturismo del PNC presentaron estratos herbáceo y arbustivo bien desarrollados (50 % o más de cobertura), pero el estrato arbustivo fue menos representativo en la zona núcleo (25 % o más de cobertura). En contraste, en los sitios de la zona de extracción de musgos, la cobertura de los estratos herbáceo y arbustivo fue baja (25 % o menos),

Table 3. Cover of the herbaceous, shrub, and canopy strata; water storage capacity (WSC), and biomass (WSC/dry biomass) of mosses, at each sampling site in a forest of *Abies religiosa* at Parque Nacional El Chico, Hidalgo. The coverage of shrub and herbaceous strata was qualitatively determined through visual observation, considering the space occupied by each stratum.

Cuadro 3. Cobertura de los estratos herbáceo, arbustivo y dosel, capacidad de almacenamiento de agua (CAA) y biomasa (CAA/biomasa seca) de musgos en cada sitio de muestreo de un bosque de *Abies religiosa* en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo. La cobertura de los estratos arbustivo y herbáceo se determinó en forma cualitativa (visual) con base en el espacio ocupado por cada estrato.

Site/Sitio	Strata cover / Cobertura del estrato (%)			Elevation / Altitud (m)	WSC / CAA (g·cm ⁻²)	Biomass / Biomasa (g·cm ⁻²)
	Herbaceous / Herbáceo	Shrub / Arbustivo	Canopy / Dosel			
A. Cedros	50-74.9	25-49.9	97	2871	0.171	0.053
B. Los Shishis	50-74.9	50-74.9	93	2919	0.161	0.051
C. Los Conejos	75-100	50-74.9	93	2822	0.115	0.599
D. Camino Conejos	50-74.9	25-49.9	96	2822	0.096	0.049
E. La Peña Orozca	50-74.9	25-49.9	96	2850	0.245	0.044
F. La Orozca	50-74.9	25-49.9	94	2851	0.254	0.042
G. Esquillero 1	10-24.9	<9.9	93	2957	0.087	0.140
H. Esquillero 2	<9.9	<9.9	98	2957	0.064	0.073
I. Cruz Blanca	<9.9	<9.9	95	2891	0.233	0.054
J. Viga Tirada	<9.9	<9.9	94	2901	0.245	0.042

the canopy coverage was relatively uniform (between 92.5 % and 98 %).

Regarding the herbaceous and shrub strata, in all sites, the most common species and with the highest contribution to the percentage of cover were: *Acaena elongata* L., *Ageratina glabrata* (Kunth) R. M. King & H. Rob., *Alchemilla procumbens* (Rose) Rydb., *Baccharis conferta* Kunth, *Ribes ciliatum* Humb. & Bonpl. ex Roem. & Schult., *Roldana angulifolia* (DC.) H. Rob. & Brettell, *Salvia elegans* Vahl, *Sigesbeckia jorullensis* Kunth and *Symphoricarpus microphyllus* Kunth. It should be emphasized that the percent cover of herbs and shrubs was estimated at the stratum level, not at the species level.

Discussion

In all examined sites, *T. delicatulum* var. *delicatulum* stood out as the most significant moss species in terms of biomass and WSC values. The widespread presence and structural importance, reflected in higher biomass, across all sites suggest that this taxon possesses a notable capacity for adaptation and phenotypic plasticity compared to other coexisting moss species within the altitude gradient of 2 822 to 2 957 m and the analyzed vegetation types (Anastacio Martínez et al., 2021). Consistent with these findings, Cárdenas (1999) notes that this moss variety thrives in mature forests or at different stages of succession with varying degrees of disturbance, where trees of the genera *Abies*, *Juniperus*, and *Quercus* dominate, mainly; that is, they grow in heterogeneous microenvironmental conditions either under the shade of the canopy or with exposure to radiation (soil, trunks, roots or branches), in dry or humid places, in an altitudinal interval that ranges between 2 830 and 2 900 m. In any case, all identified mosses share characteristics: wide geographic distribution on the planet, presence and structural importance in various types of vegetation and at different stages of succession, which indicates that they can survive in a wide range of environmental conditions (Hernández-Rodríguez et al., 2021; Sharp et al., 1994).

The results clearly show the impact of tourism and extraction activities on the most structurally important moss species in the oyamel fir forest of Parque Nacional El Chico, Hidalgo, since there are significant differences in the wet biomass, dry biomass and WSC of mosses between sampling sites. These differences are related to the type of forest management or use (extraction, tourism or conservation); however, it was also found that, in some sites, variables were independent of the type of forest use or management, so it is likely that other factors at local (exposure, slope, soil type, light input and floristic composition) and regional (temperature and humidity) scales influence the

por lo que el piso forestal estaba cubierto por plantas de hábito rastrero; es decir, por los musgos. Es importante mencionar que, en todos los sitios de muestreo, la especie arbórea dominante fue *A. religiosa* y que la cobertura del dosel fue relativamente homogénea (entre 92.5 y 98 %).

Con respecto a los estratos herbáceo y arbustivo, en todos los sitios, las especies más comunes y con mayor contribución al porcentaje de cobertura fueron: *Acaena elongata* L., *Ageratina glabrata* (Kunth) R. M. King & H. Rob., *Alchemilla procumbens* (Rose) Rydb., *Baccharis conferta* Kunth, *Ribes ciliatum* Humb. & Bonpl. ex Roem. & Schult., *Roldana angulifolia* (DC.) H. Rob. & Brettell, *Salvia elegans* Vahl, *Sigesbeckia jorullensis* Kunth y *Symphoricarpus microphyllus* Kunth. Es conveniente recalcar que el porcentaje de cobertura de hierbas y arbustos se estimó a nivel de estrato, no a nivel de especie.

Discusión

En todos los sitios analizados, la especie de musgo con mayor relevancia en cuanto a los valores de biomasa y CAA fue *T. delicatulum* var. *delicatulum*. La presencia e importancia estructural (biomasa más alta) de las poblaciones de este taxón en todos los sitios indican que tiene capacidad de adaptación y plasticidad fenotípica más alta que las demás especies de musgos que coexisten en el gradiente de altitud entre 2 822 y 2 981 m y tipo de vegetación analizados (Anastacio Martínez et al., 2021). Acorde con lo anterior, Cárdenas (1999) menciona que esta variedad se desarrolla en bosques maduros o en distintas etapas de la sucesión (distinto grado de perturbación) donde dominan árboles de los géneros *Abies*, *Juniperus* y *Quercus*, principalmente; es decir, crecen en condiciones microambientales heterogéneas ya sea bajo la sombra del dosel o con exposición a la radiación (suelo, troncos, raíces o ramas), en lugares secos o húmedos, en un intervalo altitudinal que oscila entre 2 830 y 2 900 m. De cualquier forma, todos los musgos identificados comparten características: amplia distribución geográfica en el planeta, presencia e importancia estructural en varios tipos de vegetación y en distintas etapas de la sucesión, lo cual indica que pueden sobrevivir en un espectro amplio de condiciones ambientales (Hernández-Rodríguez et al., 2021; Sharp et al., 1994).

Los resultados muestran con claridad los indicios del impacto de las actividades turísticas y de extracción sobre las especies de musgos con mayor importancia estructural del bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, dado que existen diferencias significativas en la biomasa húmeda, biomasa seca y CAA de los musgos entre sitios de muestreo. Estas diferencias están relacionadas con el tipo de manejo o uso del bosque (extracción, turismo o conservación); sin embargo, también se encontró que, en algunos

structure of the moss stratum (Fojcik et al., 2019; Stefanska-Krzaczek et al., 2022; Toro Manriquez et al., 2020). In this sense, several authors indicate that the presence and abundance of moss species is related to other plant groups and to multiple environmental factors such as solar radiation, canopy cover, humidity, and soil properties (Oishi, 2018; Siwach et al., 2021; Toro Manriquez et al., 2020).

In the present study, biomass and WSC values of mosses and percent cover of herbaceous and shrub strata in the oyamel fir forest of Parque Nacional El Chico differed markedly between managed/used (moss extraction/ecotourism) and unmanaged (core zone) sites. This is consistent with results in other studies indicating that bryophyte richness, distribution, and biomass are closely associated with the composition and structural values of coexisting vascular plant species (Fojcik et al., 2019; Hernández-Rodríguez et al., 2021; Stefanska-Krzaczek et al., 2022; Toro Manriquez et al., 2020).

The cover of the herbaceous and shrub stratum is negatively related to the total cover or biomass of bryophytes, due to competition for water, light and growth substrate (Fojcik et al., 2019). In the study area, the understory structure was evidently modified in two of the sites where moss is extracted, there the cover of herbaceous and shrub strata was drastically reduced and the biomass and WSC of mosses increased. However, at two remaining sites, biomass and WSC were not significantly different from the values estimated at the core zone sites. In these cases, it is possible that the upper tree layer dominated by *A. religiosa* in all sampling sites, by remaining intact, is generating a buffering effect by providing partial protection against desiccation and the passage of enough light for moss growth and reproduction (Hernández-Rodríguez et al., 2021; Toro Manriquez et al., 2020). In the synecological analysis conducted by Hernández-Álvarez et al. (2021), the species composition of the herbaceous and shrub stratum of the oyamel fir forest showed no difference between sites; the species identified were characteristic of this type of vegetation, so the differences between sites were at the structural level (cover).

In general, the results indicate that there are evident changes in understory structure (herbs and shrubs) and in biomass and WSC of mosses, among sites with different use and management. Therefore, a detailed study of forest structure and quantification of local environmental factors (light, temperature, humidity, exposure and slope) under different management conditions (Gabriel et al., 2014; Hernández-Rodríguez et al., 2021; Herrera-Paniagua et al., 2018; Zepeda-Gómez et al., 2014) and over time, through a monitoring program, are necessary. In this way, it would be possible to define more precisely what the near future

sitios, las variables fueron independientes del tipo de uso o manejo del bosque, por lo que es probable que otros factores a escala local (exposición, pendiente, tipo de suelo, entrada de luz y composición florística) y regional (temperatura y humedad) influyan sobre la estructura del estrato muscinal (Fojcik et al., 2019; Stefanska-Krzaczek et al., 2022; Toro Manriquez et al., 2020). En este sentido, varios autores indican que la presencia y abundancia de las especies de musgos está relacionada con otros grupos de plantas y con múltiples factores ambientales como la radiación solar, cobertura del dosel, humedad y propiedades del suelo (Oishi, 2018; Siwach et al., 2021; Toro Manriquez et al., 2020).

En el presente estudio, los valores de biomasa y de CAA de los musgos y el porcentaje de cobertura de los estratos herbáceo y arbustivo del bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico difirieron de forma evidente entre sitios con manejo/uso (extracción de musgo/ecoturismo) y sin manejo (zona núcleo). Esto coincide con los resultados en otros estudios que indican que la riqueza, distribución y biomasa de las briofitas se asocian estrechamente con la composición y valores estructurales de las especies de plantas vasculares con las que coexisten (Fojcik et al., 2019; Hernández-Rodríguez et al., 2021; Stefanska-Krzaczek et al., 2022; Toro Manriquez et al., 2020).

La cobertura del estrato herbáceo y arbustivo se relaciona negativamente con la cobertura total o la biomasa de las briofitas, debido a la competencia por agua, luz y sustrato de crecimiento (Fojcik et al., 2019). En la zona de estudio, la estructura del sotobosque se modificó de forma evidente en dos de los sitios donde se extrae musgo, ahí la cobertura de los estratos herbáceo y arbustivo se redujo drásticamente y las biomasa y CAA de los musgos incrementaron. No obstante, en dos sitios restantes, la biomasa y CAA no difirieron significativamente con los valores estimados en los sitios de la zona núcleo. En estos casos, es posible que el estrato arbóreo superior dominado por *A. religiosa* en todos los sitios de muestreo, al permanecer intacto, esté generando un efecto amortiguador proporcionando protección parcial contra la desecación y el paso de cantidad de luz suficiente para el crecimiento y reproducción de los musgos (Hernández-Rodríguez et al., 2021; Toro Manriquez et al., 2020). En el análisis sinecológico realizado por Hernández-Álvarez et al. (2021), la composición de especies del estrato herbáceo y arbustivo del bosque de oyamel no difirió entre sitios; las especies identificadas fueron características de este tipo de vegetación, por lo que las diferencias entre sitios se presentaron a nivel estructural (cobertura).

En general, los resultados indican que hay cambios evidentes en la estructura del sotobosque (hierbas y arbustos) y en la biomasa y CAA de los musgos, entre

of the PNC's oyamel fir forest, ecotourism activities, and moss extraction will be if they continue as they have been doing so far.

The extraction of mosses from forests in Mexico should be a controlled activity. Most species of this group of plants are intensively extracted and the most affected ones such as *T. delicatulum* (Acatitla Pluma et al., 2020; Anastacio Martínez et al., 2017) are not yet included in any risk category within the Mexican Official Standard NOM-059-2010 (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2010) because there is a lack of quantitative biological information on the current status of their populations.

Conclusions

Moss species in the oyamel fir forest of Parque Nacional El Chico have high water store capacity (WSC) and wide coverage (biomass) at all sampling sites. Dry biomass, wet biomass and WSC values differed among sites, in general, depending on forest use and management (conservation, ecotourism or extraction). At moss extraction sites, herbaceous and shrub plant species cover was low compared to ecotourism and conservation sites, which probably favored the increase in moss biomass. The canopy cover could be maintaining the radiation and humidity conditions necessary for moss growth in some of the sites with use and management. Therefore, it is important to implement a monitoring program and moss management and conservation measures to maintain the basic ecological structure of the oyamel fir forest.

Acknowledgments

We thank the authorities of Parque Nacional El Chico for the facilities granted to carry out this study. In addition, we are grateful for the valuable comments and suggestions of three anonymous reviewers who contributed to substantially improve the final version of this manuscript.

End of English version

References / Referencias

- Acatitla Pluma, O., Villamil Carrera, C., & Martínez-Pérez, J. L. (2020). La importancia comercial de los musgos. *Madera y Bosques*, 26(3), e2632031. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632031>
- Anastacio Martínez, N. D., Franco-Maass, S., Valtierra Pacheco, E., & Nava Bernal, G. (2017). El proceso de extracción y comercialización del musgo (*Thuidium delicatulum*) en el Estado de México. *Ciencia Ergo Sum*, 24(1), 44–61. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10449880005>

sitios con distinto uso y manejo. Por lo anterior, es necesario un estudio detallado de la estructura del bosque y la cuantificación de los factores ambientales locales (luz, temperatura, humedad, exposición y pendiente) bajo condiciones distintas de manejo (Gabriel et al., 2014; Hernández-Rodríguez et al., 2021; Herrera-Paniagua et al., 2018; Zepeda-Gómez et al., 2014) y a través del tiempo, mediante un programa de monitoreo. De este modo se podría definir con mayor precisión cual será el futuro cercano del bosque de oyamel del PNC, las actividades de ecoturismo y extracción de musgo si continúan como hasta ahora.

La extracción de musgos de los bosques en México debería ser una actividad controlada. La mayoría de las especies de este grupo de plantas se extraen de forma intensiva y las más afectadas como *T. delicatulum* (Acatitla Pluma et al., 2020; Anastacio Martínez et al., 2017) todavía no están incluidas en alguna categoría de riesgo dentro de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-2010 (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2010) porque se carece de información biológica cuantitativa del estado actual de sus poblaciones.

Conclusiones

Las especies de musgos del bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico tienen alta capacidad de absorción de agua (CAA) y amplia cobertura (biomasa) en todos los sitios de muestreo. Los valores de biomasa seca, biomasa húmeda y CAA difirieron entre sitios, en general, dependiendo del uso y manejo del bosque (conservación, ecoturismo o extracción). En los sitios donde se extrae musgo, la cobertura de especies de plantas herbáceas y arbustivas fue baja, comparada con la de los sitios de ecoturismo y conservación, lo cual probablemente favoreció el incremento en la biomasa muscinal. La cobertura del dosel podría estar manteniendo las condiciones de radiación y humedad necesarias, para el crecimiento de los musgos en algunos de los sitios con uso y manejo. Por lo anterior, se considera importante implementar un programa de monitoreo y medidas de manejo y conservación de los musgos, para mantener la estructura ecológica básica del bosque de oyamel.

Agradecimientos

Se agradece ampliamente a las autoridades del Parque Nacional El Chico por las facilidades otorgadas para realizar este trabajo. Adicionalmente, agradecemos los valiosos comentarios y sugerencias de tres revisores anónimos que contribuyeron a mejorar la versión final del manuscrito en forma sustancial.

Fin de la versión en español

- Baudry, O., Charmentant, C., Collet, C., & Ponette, Q. (2014). Estimating light climate in forest with the convex densiometer: Operator effect, geometry and relation to diffuse light. *European Journal of Forest Research*, 133, 101–110. <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0746-6>
- Cárdenas, S. (1999). Los musgos pleurocárpicos del Valle de México. *Tropical Bryology*, 16, 109–116. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=6831567&pid=S1870-3453201400010001200007&lng=es
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2005). *Programa de conservación y manejo: Parque Nacional El Chico, México*. https://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/PN_Chico.pdf
- Delgadillo-Moya, C. (2014). Biodiversidad de Bryophyta (musgos) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 100–105. <https://doi.org/10.7550/rmb.30953>
- Delgadillo, C., Villaseñor, J. L., Cárdenas, Á., & Ortiz, E. (2014). Diversidad y distribución de musgos en el estado de Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 84–97. <https://doi.org/10.7550/rmb.35761>
- Fehmi, J. S. (2010). Confusion among three common plant cover definitions may result in data unsuited for comparison. *Journal of Vegetation Science*, 21(2), 273–279. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2009.01141.x>
- Fojcik, B., Wierzgoń, M., & Chmura D. (2019). Response of bryophytes to disturbances in managed forests. A case study from a Polish forest. *Cryptogamie, Bryologie*, 40(10), 105–118. <https://doi.org/10.5252/cryptogamie-bryologie2019v40a10>
- Gabriel, R., Coelho, M. M., Henriques, D. S., Borges, P. A., Elias, R. B., Kluge, J., & Ah-Peng, C. (2014). Long-term monitoring across elevational gradients to assess ecological hypothesis: a description of standardized sampling methods in oceanic islands and first results. *Arquipelago -- Life and Marine Sciences*, 31, 45–67. <https://islandlab.uac.pt/fotos/proyectos/1440666688.pdf>
- Goffinet, B., Buck, W., & Shaw, A. (2008). Morphology, anatomy, and classification of the Bryophyta. In B. Shaw, & A. Goffinet (Eds.), *Bryophyte biology*. Cambridge University Press.
- Gradstein, R. S., Churchill, S. P., & Salazar-Allen, N. (2001). *Guide to the bryophytes of Tropical America* (vol. 86). New York Botanical Garden.
- Hammer, Ø., Harper, D. A., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological Statics software package for education and data analysis. *Paleontología Electronica*, 4(1), 9. https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf
- Hernández-Álvarez, A. G., Reyes-Ortiz, J. L., Villanueva-Díaz, J., & Sánchez-González, A. (2021). Variación en la estructura del bosque de *Abies religiosa* (Pinaceae), en diferentes condiciones de manejo y disturbio. *Acta Botanica Mexicana*, 128, e1752. <https://doi.org/10.21829/abm128.2021.1752>
- Hernández-Rodríguez, E., & Delgadillo-Moya, C. (2021). The ethnobotany of bryophytes in Mexico. *Botanical Sciences*, 99(11), 13–27. <https://doi.org/10.17129/botsci.2685>
- Hernández-Rodríguez, E., Escalera-Vázquez, L. H., García-Ávila, D., Montoro Girona, M., & Mendoza, E. (2021). Reduced-impact logging maintain high moss diversity in temperate forests. *Forests*, 12(4), 383. <https://doi.org/10.3390/f12040383>
- Herrera-Paniagua, P., Martínez, M., & Delgadillo-Moya, C. (2018). Patrones de riqueza y de asociación al hábitat y microhábitat de los musgos del Área Natural Protegida Sierra de Lobos, Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 89(4), 1002–1011. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2018.4.2455>
- Lemmon, P. E. (1956). A spherical densiometer for estimating forest overstorey density. *Forest Science*, 2(4), 314–320. <https://doi.org/10.1093/forestscience/2.4.314>
- Matamoros, P. R. A., & Ceballos, M. A. (2017). Errores conceptuales de estadística más comunes en publicaciones científicas. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 12(3), 211–229. <http://doi.org/10.21615/cesmvz.12.3.4>
- Mejía Canales, A., Franco-Maass, S., Endara Agramont, A. R., & Ávila Akerberg, V. (2018). Caracterización del sotobosque en bosques densos de pino y oyamel en el Nevado de Toluca. *Madera y Bosques*, 24(3), e2431656. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.e2431656>
- Mueller-Dombois, D., & Ellenberg, H. (1974). *Aims and methods of vegetation ecology*. John Wiley and Sons.
- Oishi, Y. (2018). Evaluation of the water storage capacity of bryophytes along an altitudinal gradient from temperate forests to the alpine zone. *Forests*, 9(7), 433. <https://doi.org/10.3390/f9070433>
- Razo-Zárate, R., Gordillo-Martínez, A., Rodríguez-Laguna, R., Maycotte-Morales, C., & Acevedo-Sandoval, O. (2013). Escenarios de carbono para el bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 9(1). <https://revista.itson.edu.mx/index.php/rlrn/article/view/207>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2010). *Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo*. Diario Oficial de la Federación. https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5173091
- Sharp, A. J., Crum, H., & Eckel, P. M. (1944). *The moss flora of Mexico* (vol. 69). New York Botanical Garden.
- Siwach, A., Kaushal, S., & Baishya, R. (2021). Effect of mosses on physical and chemical properties of soil in temperate forests of Garhwal Himalayas. *Journal of Tropical Ecology*, 37(3), 126–135. <https://doi.org/10.1017/S0266467421000249>
- Stefanska-Krzaczek, E., Swacha, G., Zarnowiec, J., Raduła, M., Kaćki, Z., & Staniaszek-Kik, M. (2022). Central European forest floor bryophytes: Richness, species composition. *Ecological Indicators*, 139, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108954>
- Toro Manriquez, M., Ardiles, V., Promis, Á., Huertas Herrera, A., Soler, R., Lencinas, M., & Martínez Pastur, G. (2020). Forest canopy cover composition and landscape influence on bryophyte communities in *Nothofagus* forests of southern Patagonia. *PLoS ONE*, 15(11), e0232922. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232922>
- Vanderpoorten, A., & Goffinet, B. (2009). Sampling of bryophytes. In A. Vanderpoorten, & B. Goffinet (Eds.), *Introduction to bryophyte biology* (2nd ed., pp. 33–45). Cambridge University Press.
- WFO (2023). *WFO Plant List. Snapshots of the taxonomy*. <https://wfoplantlist.org/>
- Zepeda-Gómez, C., Ávila-Pérez, P., Díaz-García, U. S., Alanís-Martínez, Y., Zarazúa-Ortega, G., & Amaya-Chávez, A. (2014). Diversidad de musgos epífitos de la zona metropolitana del valle de Toluca, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 108–124. <https://doi.org/10.7550/rmb.35456>

Annex 1. General characteristics of the moss species identified in the sampling sites of an *Abies religiosa* forest at Parque Nacional El Chico, Hidalgo. The description and information on the habitat and geographic distribution of the species were obtained from Sharp et al. (1994) and WFO (2023).

Anexo 1. Características generales de las especies identificadas de musgos en los sitios de muestreo de un bosque de *Abies religiosa* en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo. La descripción e información del hábitat y distribución geográfica de las especies se obtuvieron de Sharp et al. (1994) y WFO (2023).

***Bryum argenteum* Hedw.:** small, scarcely shiny, and julaceous plants. Caulids very thin, either simple or branched. Phyllids pressed against the caulid when dry but extend when wet. They are ovate, with a hyaline apex, somewhat acuminate and apiculate; the margins are entire, flat, or slightly reflexed. The costa terminates below the apex or may be excurrent, and the basal laminal cells are hexagonal or rectangular. The species is cosmopolitan. In Mexico, it is distributed throughout almost the entire country and is found on soil, rocks, cement walls, tiles, tree bark, and in open to semi-shaded sites.

***Bryum argenteum* Hedw.:** Plantas pequeñas, escasamente lustrosas y juláceas. Caulidios muy delgados, simples o ramificados. Filidios apesados al caulidio cuando están secos, extendidos cuando están húmedos, ovados con el ápice hialino, algo acuminado y apiculado; márgenes enteros, planos o ligeramente reflexos; la costa termina debajo del ápice o puede ser excurrente, células laminares basales hexagonales o rectangulares. La especie es cosmopolita. En México se distribuye en casi todo el país y se encuentra en suelo, rocas, paredes de cemento, tejas, cortezas de árboles y en sitios abiertos a semisombreados.

***Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid.:** The synonym is *Ceratodon stenocarpus* Bruch & Schimp. The plants are small to medium-sized and can exhibit colors ranging from dark green and yellowish-green to reddish tones. Caulids are erect, simple, or sparingly branched, with roots at the base. Phyllids are slightly appressed or twisted when dry, becoming erect when wet. They are lanceolate and gradually acuminate, with strongly reflexed or revolute margins, irregularly serrulate near the apex. The costa (midrib) is thick, percurrent to slightly excurrent. The upper and middle cells are square with slightly thick and smooth walls, while the basal cells are short and rectangular with fairly thin walls. This species is cosmopolitan. In Mexico, it is found in different habitats due to its broad ecological tolerance.

***Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid.:** El sinónimo es *Ceratodon stenocarpus* Bruch & Schimp. Las plantas son de tamaño pequeño a mediano de color verde oscuro, verde amarillento o incluso rojizas. Caulidios erectos, simples o escasamente ramificados, radiculosos en la base. Filidios ligeramente adpresos o retorcidos cuando están secos, erectos cuando están húmedos, lanceolados y gradualmente acuminados; márgenes fuertemente reflexos o revolutos, serrulados irregularmente cerca del ápice; costa gruesa, percurrente a poco excurrente; células superiores y medias cuadradas de paredes ligeramente gruesas y lisas; células basales cortas y rectangulares con paredes bastante delgadas. La especie es cosmopolita. En México se encuentra en diferentes hábitats, debido a su amplia tolerancia ecológica.

***Cyrtiohypnum mexicanum* (Mitt.) W. R. Buck & H. A. Crum:** Thin plants of light green or yellowish color. Creeping caulids, irregularly pinnate or bipinnate; numerous paraphilia, two to five cells long, very short or linear, ending in a conical cell with one to two very small papillae. Phyllids strongly curved when dry, spreading when wet, broadly ovate, acuminate, and pleated near the base; margins sometimes narrowly recurved; yellowish costa ending near the apex; cells with thin walls and unipapillose on both surfaces. The species is mainly distributed in Mexico with some representatives in South America and grows in humid places on tree bark, trunks, stumps, and rocks.

***Cyrtiohypnum mexicanum* (Mitt.) W. R. Buck & H. A. Crum:** Plantas delgadas de color verde claro o amarillento. Caulidios rastreros, irregularmente pinnados o bipinnados; parafilos numerosos de dos a cinco células de largo, muy cortos o lineales, terminando en una célula cónica con una a dos papilas muy pequeñas. Filidios fuertemente curvados cuando están secos, extendidos cuando están húmedos, ampliamente ovados, acuminados y plicados cerca de la base; márgenes a veces estrechamente recurvados; costa amarillenta que termina cerca del ápice; células de paredes delgadas y unipapilosas en ambas superficies. La especie se distribuye principalmente en México con algunos representantes en Sudamérica y crece en lugares húmedos sobre corteza de árboles, troncos, tocones y rocas.

***Helicodontium capillare* (Hedw.) A. Jaeger:** Small plants on flat mats of opaque green color. Caulids with numerous branches, mostly short, slender and terete when dry. Phyllids spreading when wet, oblong-ovate-lanceolate to ovate and acute to short acuminate; margins crenulate to serrulate at top; costa occupying 2/3 to 3/4 of phyllid length; lamellar cells rhomboidal to hexagonal, smooth, becoming longer toward base of phyllid; wing cells square arranged in four to six rows. When plants grow on habitats such as rocks or decaying logs, the apex of the phyllids is usually large

***Helicodontium capillare* (Hedw.) A. Jaeger:** Plantas pequeñas en esteras planas de color verde opaco. Caulidios con ramas numerosas, mayormente cortas, delgadas y teretes cuando están secas. Filidios extendidos cuando están húmedos, oblongos-ovados-lanceolados a ovados y agudos a corto acuminados; márgenes crenulados a serrulados en la parte superior; costa ocupando 2/3 a 3/4 de la longitud del filidio; células laminares romboidales a hexagonales, lisas, volviéndose más largas hacia la base del filidio; las células

and the costa relatively short. Its main area of distribution is tropical America. In Mexico it grows on soil and humus in humid forests.

***Thuidium delicatulum* (Hedw.) Schimp. var. *delicatulum*:** Plants are robust green or yellowish brown. Two to three pinnate and somewhat leafy caulids; paraphilia abundant, usually papillose at cell ends. Phyllids of main axis erect, adpressed when dry, and erect and spreading when moist, triangular-ovate, not plicate; margins revolute, papillose-serrulate; apex acuminate; costa terminating before apex; distal lamellar cells irregularly oblong-hexagonal, unipapillose abaxially and papillae usually curved and somewhat bifurcate. Phyllids of the secondary branches are similar to those of the main branches, but smaller. Its distribution is mainly Pantropical, but it can be found in the Holarctic region. In Mexico it grows mainly in moist, shady soil, humus, rocks, logs or stumps, less frequently on the bark at the base of trees or even on trunks in particularly humid places.

***Thuidium delicatulum* var. *peruvianum* (Mitt.) H. A. Crum:** Robust, dull green, yellow or brown plants. One to three creeping to ascending caulids, usually curved and pinnate. Main axis phyllids about 2 mm long, strongly plicate, abruptly narrowed to an often-falcate acumen; papillae simple and curved. Perichaeal phyllids ciliate. The species is distributed mainly in tropical America. In Mexico it is found on soil and rocks.

***Thuidium delicatulum* var. *radicans* (Kindb.) H. A. Crum, Steere & L. E. Anderson.** Robust, dull green, yellow or brown plants. One to three creeping to ascending caulids, usually curved and pinnate. Main axis phyllids 1-1.5 mm long, ending in a slender tip composed of two to eight cells in a single row. The perichaeal phyllids are usually not ciliated, rarely present cilia, but are not numerous and not well developed. It is a cosmopolitan species. In Mexico it is found growing mainly on humus and soil, although it can also grow on other substrates.

alares son cuadradas dispuestas en cuatro a seis filas. Cuando las plantas crecen en hábitats como rocas o troncos en descomposición, el ápice de los filidios es usualmente grande y la costa relativamente corta. Su área de distribución principal es América tropical. En México crece sobre suelo y humus en bosques húmedos.

***Thuidium delicatulum* (Hedw.) Schimp. var. *delicatulum*:** Las plantas son robustas de color verde o marrón amarillento. Dos a tres caulidios pinnados y algo frondosos; parafilos abundantes, generalmente papilosos en los extremos de las células. Los filidios del eje principal son erectos, adpresos cuando están secos, y erectos y extendidos cuando están húmedos, triangular-ovados, no plicados; márgenes revolutos, papilosos-serrulados; ápice acuminado; la costa termina antes del ápice; células laminares distales irregularmente oblongas-hexagonales, unipapilosas en la parte abaxial y las papilas generalmente son curvadas y algo bifurcadas. Los filidios de las ramas secundarias son similares a los de las ramas principales, pero más pequeños. Su distribución es principalmente Pantropical, pero se puede encontrar en la región Holártica. En México crece principalmente en suelo húmedo y sombreado, humus, rocas, troncos o tocones, con menos frecuencia en la corteza de la base de los árboles o incluso en los troncos en lugares particularmente húmedos.

***Thuidium delicatulum* var. *peruvianum* (Mitt.) H. A. Crum:** Plantas robustas de color verde opaco, amarillas o marrones. Uno a tres caulidios rastreros a ascendentes, generalmente curvados y pinnados. Filidios del eje principal cerca de 2 mm de largo, fuertemente plicados, abruptamente estrechos hasta convertirse en un acumen a menudo falcado; papilas simples y curvadas. Filidios periqueciales ciliados. La especie se distribuye principalmente en América tropical. En México se encuentra sobre suelo y roca.

***Thuidium delicatulum* var. *radicans* (Kindb.) H. A. Crum, Steere & L. E. Anderson.** Plantas robustas de color verde opaco, amarillas o marrones. Uno a tres caulidios rastreros a ascendentes, generalmente curvados y pinnados. Filidios del eje principal de 1-1.5 mm de largo, terminando en una punta delgada compuesta de dos a ocho células en una hilera simple. Los filidios periqueciales generalmente no son ciliados, raras veces presentan cilios, pero no son numerosos y no están bien desarrollados. Es una especie cosmopolita. En México se encuentra creciendo sobre humus y suelo principalmente, aunque también puede crecer en otros sustratos.