



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

**Evaluación del Potencial de Bioextracción de
Elementos Potencialmente Tóxicos por Briofitas
Asociadas al Jal Minero “La Concha”, Taxco,
Guerrero**

Ciencias Ambientales

T E S I S

Que para obtener el título de:

Biólogo

P R E S E N T A:

Villagomez Peña Ian Antuan

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Jorge Antonio Valdivia Anistro

ASESOR INTERNO:

Dra. Alberta Lourdes Castillo Granada



CDMX

SEPTIEMBRE, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"ZARAGOZA"
DIRECCIÓN

JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

PRESENTE.

Comunico a usted que el alumno VILLAGOMEZ PEÑA IAN ANTUAN, con número de cuenta 310134938, de la carrera de Biología, se le ha fijado el día 12 de septiembre de 2022 a las 15:00 hrs., para presentar examen profesional, el cual tendrá lugar en esta Facultad con el siguiente jurado:

PRESIDENTE Biól. MARICELA ARTEAGA MEJÍA

VOCAL Dr. JORGE ANTONIO VALDIVIA ANISTRO

SECRETARIO Dra. LOURDES ALBERTA CASTILLO
GRANADA

SUPLENTE Biól. MARCO ANTONIO HERNÁNDEZ MUÑOZ

SUPLENTE Dra. HORTENSIA ROSAS ACEVEDO

Hortensia Rosas A

El título de la tesis que presenta es: **Evaluación del potencial de bioextracción de elementos potencialmente tóxicos por briofitas asociadas al jal minero "La Concha", Taxco, Guerrero.**

Opción de titulación: Tesis

Agradeceré por anticipado su aceptación y hago propia la ocasión para saludarle.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Ciudad de México, a 22 de agosto de 2022

DR. VICENTE JESÚS HERNÁNDEZ ABAD

DIRECTOR

VO. BO.

RECIBÍ

OFICINA DE EXÁMENES

PROFESIONALES Y DE GRADO

Biól. MARICELA ARTEAGA MEJÍA

JEFA DE CARRERA

Agradecimientos Institucionales

Esta tesis fue realizada con el recurso otorgado al proyecto:

Fortalecimiento del proceso de enseñanza-aprendizaje de la Química en la carrera de Biología PE204517 del Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME) por la Dirección General de Asuntos del Personal académico (DGAPA), UNAM.

Al Doctor Claudio Delgadillo Moya, del Instituto de Biología (UNAM) Edificio B, Piso 1: 124 Briofitas; por su colaboración en la determinación taxonómica de los ejemplares estudiados durante el desarrollo de esta tesis.

A la Doctora Lourdes Castillo Granada, como responsable del laboratorio de espectroscopia de la Facultad de Estudios Superiores (FES) Zaragoza por el apoyo para la obtención y explicación de la técnica de análisis instrumental de absorción atómica.

Al laboratorio de Estequiometría Ambiental de la Unidad Multidisciplinaria de Investigación Experimental Zaragoza (UMIEZ).

A mis tutores; Dr. Jorge Valdivia y Dra. Lurdes Castillo por su apoyo, tiempo, paciencia y enseñanzas durante estos últimos años.

A mis sinodales: Biol. Maricela Arteaga, Biol. Marco Hernández, Dra. Hortensia Rosas, por su tiempo, atención y comentarios que ayudaron a enriquecer este trabajo.

Agradecimientos Personales

A mis padres, que me apoyaron en todo momento, en las decisiones que tome, las cuales me han llevado lograr esta meta, que sentía tan imposible, por la paciencia, cariño y la guía ya que me mostraron el camino correcto para cumplir uno de mis sueños.

A mi hermana, quien me ha acompañado en todo momento, quien siempre ha estado a mi lado sujetándome la mano, quien me guía y me presiona a continuar, con quien he vivido más de mil aventuras.

A mis primos, quienes con sus preguntas me llevan a investigar y que me cuestione aún mas sobre la vida y la ciencia, quienes me alientan a continuar aprendiendo.

A Ilse y Diana, quienes me acompañaron durante toda la carrera, de quienes me volví inseparable, a quienes acudo por consejos, quienes a pesar del tiempo sé que continúan cerca.

A Diana, quien conocí en el mejor momento, quien se ha convertido en mi confidente, el hombro sobre el que puedo llorar, quien me ayudo a recuperar el camino.

A Nadia, Raquel, Adrián, Angy, Mariana, Andrés, Zuceth, y todos aquellos que estuvieron en mi vida durante estos últimos años, quienes me apoyaron en alguna etapa de la elaboración de este trabajo, que, sin importar la distancia, los cambios y las decisiones que tomamos, quiero que sepan que siempre les estaré agradecido.

露を
洗ふ
世を

*¡Como me gustaría
lavar el polvo del mundo
con las gotas del rocío!*

— Bashō

Índice

Resumen	1
Introducción.....	2
Briophyta	2
Musgos (<i>Bryophyta</i>)	3
Antecedentes	6
Importancia de los musgos	6
Justificación	8
Planteamiento del Problema	9
Hipótesis.....	9
Objetivos.....	9
General.....	9
Particulares.....	9
Zona de Estudio	10
Método.....	13
Colecta e identificación taxonómica de los musgos asociados al jal.	13
Caracterización química del sustrato asociado a los musgos.	14
Análisis de la composición química de los musgos.	16
Cuantificación de los elementos potencialmente tóxicos (EPT).	16
Determinación del potencial de bioextracción de EPT.	17
Análisis estadísticos.	17
Resultados.....	1
Taxonomía de los musgos colectados en el jal “La Concha”.	1
Composición Química del Sustrato del jal “La Concha”	2
<i>pH</i>	4
<i>Determinación de fosfatos (PO_4^{3-})</i>	6
<i>Contenido de materia orgánica (MO)</i>	9
<i>Determinación de sulfatos (SO_4^{2-})</i>	12
<i>Capacidad de intercambio catiónico (CIC)</i>	16

Composición química de la biomasa de los musgos colectados en el jal “La Concha”	18
<i>pH de la biomasa de musgos</i>	18
<i>Concentración de fósforo total en tejido vegetal de los musgos</i>	19
<i>Carbono orgánico en tejido vegetal de los musgos</i>	20
Concentración de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) en el sustrato del jal “La Concha”	21
Concentración de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) en la biomasa de los musgos colonizadores del jal “La Concha”	23
Análisis estadístico	27
Discusión	33
Variación del pH en sustrato y en la biomasa de los musgos	35
Concentración del fósforo en sustrato y en biomasa de los musgos	36
Contenido de materia orgánica en sustrato y carbono orgánico en biomasa de los musgos	38
Capacidad de intercambio catiónico y concentración de sulfatos en sustrato	39
Potencial de bioextracción de metales pesados por los musgos colonizadores del jal “La Concha”	40
Integración de los análisis estadísticos	48
Conclusiones	50
Referencias	52
Anexos	62

Índice de figuras

Figura 1. Estructura anatomica de los musgos.	4
Figura 2. Ciclo de vida de los musgos.....	4
Figura 3. Mapa de localización de Taxco de Alarcón Guerrero. El punto en color turquesa representa la ubicación de la zona de estudio.....	10
Figura 4. Ubicación de la mina y el jal minero "La Concha", Taxco Guerrero.	12
Figura 5. Ubicación de sitios de muestreo.....	1
Figura 6. Valores de pH en el sustrato de los ejemplares de musgo colectados en el jal “La Concha”. Las siglas corresponden a abreviaciones de las determinaciones taxonómicas de cada ejemplar de musgo. Ba= <i>Bryum argenteum</i> ; Aa= <i>Anoetangium aestivum</i> ; Br= <i>Bryaceae</i> ; G+Hi <i>Gymnostomum</i> + <i>Hyophila involuta</i> ; Ba+Dr= <i>Bryum argenteum</i> + <i>Didimodon rigidulus</i> ; Hi= <i>Hyophila involuta</i> ; Sl+Hi= <i>Scopelophila lingulata</i> + <i>Hyophila involuta</i> ; Bs= <i>Brachymerium systylium</i>	4
Figura 7. Cuantificación del pH en el sustrato por sitio de muestreo.....	5
Figura 8. Variación del pH del sustrato asociado al rizoide de los grupos taxonómicos de musgos identificados. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo. Ba= <i>Bryum argenteum</i> ; Aa= <i>Anoetangium aestivum</i> ; Br= <i>Bryaceae</i> ; G+Hi <i>Gymnostomum</i> + <i>Hyophila involuta</i> ; Ba+Dr= <i>Bryum argenteum</i> + <i>Didimodon rigidulus</i> ; Hi= <i>Hyophila involuta</i> ; Sl+Hi= <i>Scopelophila lingulata</i> + <i>Hyophila involuta</i> ; Bs= <i>Brachymerium systylium</i>	6
Figura 9 Concentraciones de fosfatos en el sustrato de los ejemplares de musgo colectados en el jal “La Concha”. Las siglas corresponden a abreviaciones de las determinaciones taxonómicas de cada ejemplar de musgo. Ba= <i>Bryum argenteum</i> ; Aa= <i>Anoetangium aestivum</i> ; Br= <i>Bryaceae</i> ; G+Hi <i>Gymnostomum</i> + <i>Hyophila involuta</i> ; Ba+Dr= <i>Bryum argenteum</i> + <i>Didimodon rigidulus</i> ; Hi= <i>Hyophila involuta</i> ; Sl+Hi= <i>Scopelophila lingulata</i> + <i>Hyophila involuta</i> ; Bs= <i>Brachymerium systylium</i>	7
Figura 10. Concentración de fosfatos por sitio de muestreo.	8
Figura 11. Variación de la concentracion de fosfatos en el sustrato agrupado por grupo taxonomico de los musgos. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo. Ba= <i>Bryum argenteum</i> ; Aa= <i>Anoetangium aestivum</i> ; Br= <i>Bryaceae</i> ; G+Hi	

Gymnostomum + Hyophila involuta; Ba+Dr= *Bryum argenteum + Didimodon rigidulus*; Hi= *Hyophila involuta*; Sl+Hi=*Scopelophila lingulata + Hyophila involuta*; Bs= *Brachymenium systylium*..... 9

Figura 12. Porcentaje de materia orgánica (%MO) en las muestras de sustrato presentes en cada uno de los ejemplares de musgos colectados. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo: Ba= *Bryum argenteum*; Aa= *Anoetangium aestivum*; Br= *Bryaceae*; G+Hi= *Gymnostomum + Hyophila involuta*; Ba+Dr= *Bryum argenteum + Didimodon rigidulus*; Hi= *Hyophila involuta*; Sl+Hi=*Scopelophila lingulata + Hyophila involuta*; Bs= *Brachymenium systylium*..... 10

Figura 13. Porcentaje de materia orgánica (%MO) en el sustrato agrupado por grupo taxonómico de los musgos: Ba= *Bryum argenteum*; Aa= *Anoetangium aestivum*; Br= *Bryaceae*; G+Hi= *Gymnostomum + Hyophila involuta*; Ba+Dr= *Bryum argenteum + Didimodon rigidulus*; Hi= *Hyophila involuta*; Sl+Hi=*Scopelophila lingulata + Hyophila involuta*; Bs= *Brachymenium systylium*..... 11

Figura 14. Porcentaje de materia orgánica (%MO) del sustrato por sitio de muestreo. 12

Figura 15. Concentraciones menores de sulfatos (SO_4^{2-}) en las muestras de sustrato asociados a los ejemplares de musgo colectados en el jal “La Concha”. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo: Ba= *Bryum argenteum*; Aa= *Anoetangium aestivum*; Br= *Bryaceae*; G+Hi *Gymnostomum + Hyophila involuta*; Ba+Dr= *Bryum argenteum + Didimodon rigidulus*; Hi= *Hyophila involuta*; Sl+Hi=*Scopelophila lingulata + Hyophila involuta*; Bs= *Brachymenium systylium*..... 13

Figura 16 Concentraciones mayores de sulfatos (SO_4^{2-}) en las muestras de sustrato asociados a los ejemplares de musgo colectados en el jal “La Concha”. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo: Ba= *Bryum argenteum*; Aa= *Anoetangium aestivum*; Br= *Bryaceae*; G+Hi= *Gymnostomum + Hyophila involuta*; Ba+Dr= *Bryum argenteum + Didimodon rigidulus*; Hi= *Hyophila involuta*; Sl+Hi=*Scopelophila lingulata + Hyophila involuta*; Bs= *Brachymenium systylium*..... 14

Figura 17 Concentracion de sulfato en el sustrato agrupado por grupo taxonomico de los musgo: Ba= *Bryum argenteum*; Aa= *Anoetangium aestivum*; Br= *Bryaceae*; G+Hi *Gymnostomum + Hyophila involuta*; Ba+Dr= *Bryum argenteum + Didimodon rigidulus*; Hi=

Hyophila involuta; Sl+Hi=*Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; Bs= *Brachymerium systylium*..... 15

Figura 18. Concentración de sulfato en el sustrato agrupado por grupo taxonómico de los musgos.: Hi= *Hyophila involuta*; Sl+Hi=*Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; Bs= *Brachymerium systylium*. 16

Figura 19. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) en las muestras de sustrato asociados a los ejemplares de musgo colectados en el jal “La Concha”. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo: Ba= *Bryum argenteum*; Aa= *Anoetangium aestivum*; Br= *Bryaceae*; G+Hi *Gymnostomum* + *Hyophila involuta*; Ba+Dr= *Bryum argenteum* + *Didimodon rigidulus*; Hi= *Hyophila involuta*; Sl+Hi=*Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; Bs= *Brachymerium systylium*..... 17

Figura 20. Valores de pH cuantificados en la biomasa de los musgos colectados en el jal “La Concha”. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo: Ba= *Bryum argenteum*; Aa= *Anoetangium aestivum*; Br= *Bryaceae*; G+Hi *Gymnostomum* + *Hyophila involuta*; Ba+Dr= *Bryum argenteum* + *Didimodon rigidulus*; Hi= *Hyophila involuta*; Sl+Hi=*Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; Bs= *Brachymerium systylium*..... 18

Figura 21. Concentración de fósforo total en tejido vegetal de los musgos colectados en el jal “La Concha”. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo: Ba= *Bryum argenteum*; Aa= *Anoetangium aestivum*; Br= *Bryaceae*; G+Hi *Gymnostomum* + *Hyophila involuta*; Ba+Dr= *Bryum argenteum* + *Didimodon rigidulus*; Hi= *Hyophila involuta*; Sl+Hi=*Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; Bs= *Brachymerium systylium*..... 19

Figura 22. Contenido de carbono orgánico (%CO) y contenido de la fracción inorgánica en el tejido vegetal de los musgos identificados en el jal “La Concha”. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo: Ba= *Bryum argenteum*; Aa= *Anoetangium aestivum*; Br= *Bryaceae*; G+Hi *Gymnostomum* + *Hyophila involuta*; Ba+Dr= *Bryum argenteum* + *Didimodon rigidulus*; Hi= *Hyophila involuta*; Sl+Hi=*Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; Bs= *Brachymerium systylium*..... 20

Figura 25. Potencial de bioextracción por cada metal pesado cuantificado en la biomasa de los musgos colonizadores del jal “La Concha”. 25

Figura 26. Matriz de coeficiente de puntuación de componente.....	28
Figura 27. Distribución de los parámetros determinados en el tejido o biomasa vegetal de los musgos en los componentes principales.	28
Figura 28. Matriz de puntuación de componente en las relaciones existentes entre los EPT presentes en el tejido vegetal y los nutrientes en el sustrato.	30
Figura 29. Distribución de los metales pesados en el tejido o biomasa vegetal con los parámetros del sustrato en los componentes principales.	30
Figura 30. Puntuacion del ACP.....	32
Figura 31 Dispersión de las muestras en los componentes principales; donde se muestra la relación existente entre las especies y los análisis realizados.	33

Índice de Tablas

Tabla 1. Características fisicoquímicas y concentración de elementos potencialmente tóxicos en sustrato y biomasa de los musgos del jal minero “La Concha”. MO = Materia Orgánica, CIC = Capacidad de Intercambio Catiónico, CO= Carbono Orgánico, Pt= Fosforo total, PBEPT = Potencial de Bioextracción de Elementos Potencialmente Tóxicos.....	3
Tabla 2 Resumen de concentraciones normales, peligrosas y anómalas propuestas por Bowie &Thornton (1985) y NOM-021-RECNAT-2000.	21
Tabla 3 Valores del potencial de Bioextracción de las especies; los valores a criterio de este índice son: exclusoras (E) si el valor es menor a 0.1; tolerantes (T) en el intervalo de 0.1 a 1.0 e Hiperacumuladoras (H) si el valor es mayor a 1.0.	26
Tabla 4. Correlaciones existentes entre los análisis del tejido o biomasa vegetal de los musgos.....	27
Tabla 5. Matriz de coeficiente de puntuación de componente.	28
Tabla 6. Correlaciones entre las concentraciones de EPT en el tejido vegetal y los análisis del sustrato.....	29
Tabla 7. Matriz de coeficiente de puntuación de componente	30
Tabla 8. Correlaciones existentes entre las especies de musgos respecto a los análisis realizados.....	31
Tabla 9. Matriz de coeficiente de puntuación de componente	32

Resumen

Los musgos son plantas colonizadoras primarias en localidades húmedas con impacto o de origen antropogénico. Debido a sus propiedades tisulares, Estos organismos tienen la capacidad de absorber compuestos químicos solubles que están presentes en el ambiente. Por esta razón, son indicadores del estado trófico o del nivel de contaminación presente en los ecosistemas que habitan. Los jales son los sitios de confinamiento de los desechos generados por la industria minera. Estos desechos se caracterizan por presentar diversos factores de estrés que impiden el establecimiento de organismos vegetales. Además, los jales presentan elevadas concentraciones de metales pesados que se liberan durante su oxidación y quedan disponibles en el ambiente. En Taxco, estado de Guerrero, existen varios jales generados por la extracción de plata. Existe un solo reporte de la vegetación que se encuentra colonizando los jales de Taxco, en el cual, no se menciona la presencia de musgos. Sin embargo, durante un trabajo exploratorio en el jal “La Concha” se observó la presencia de varios tipos de musgos en el area que abarca. Por lo que, el objetivo del presente trabajo fue identificar los musgos que están colonizando “La Concha” y evaluar su potencial de bioextracción de metales pesados. Se realizó el análisis del sustrato adyacente al rizoide de los musgos colectados para determinar sus propiedades químicas, nutricionales y la concentración de los metales pesados más abundantes en el jal (Cd, Cu, Fe, Pb y Zn). También se analizó la composición química de la biomasa de los musgos y se determinó su potencial de bioextracción de los metales seleccionados. El sustrato mostró un bajo contenido de materia orgánica y el pH fue el parámetro que determina su dinámica química. En el sustrato, la concentración de los metales fue heterogénea y, en la mayoría, está por arriba de los límites máximos permisibles. La variación de la concentración de los metales pesados está en función del pH del sustrato. La biomasa de los musgos tuvo un bajo contenido de carbono orgánico. El contenido de metales pesados en biomasa fue bajo (Cd: 0.0006%, Cu: 0.26%, Fe: 0.45%, Pb, 0.59% y, Zn: 0.05%). El índice de factor bioextracción para cada metal (Cd: 0.18, Cu: 0.24, Fe: 1.3, Pb: 1.6 y, Zn: 2.68) mostró que los musgos presentes en “La Concha” son hiperacumuladores de Fe, Pb y Zn; y tolerantes para Cd y Cu. Por lo tanto, los musgos colonizadores del jal “La Concha” podrían ser una alternativa para su bioremediación.

Introducción

Briophyta

Las Briofitas (o briofitos) son un grupo antiguo de plantas terrestres que se dispersan por medio de esporas y han habitado el planeta desde hace casi 300 millones de años, su origen se remonta al Devónico. En la escala evolutiva los briofitos ocupan un lugar entre las algas verdes y las plantas vasculares (helechos y plantas con semilla); con las cuales, comparten características, como la presencia de clorofila como su principal pigmento fotosintético y el almidón como su principal reserva alimentaria. A diferencia de las algas, los briofitos, tienen órganos reproductivos más complejos, constituidos por esporas rodeadas de una cubierta de células estériles que retienen al cigoto; las cuales, son características fundamentales para el desarrollo en tierra. La falta de sistemas de conducción de nutrientes y agua es la principal diferencia que presentan con las plantas vasculares, de igual manera la alternancia de generaciones es una de las diferencias más significativas ya que, en las plantas terrestres las estructuras que son apreciadas a simple vista es el esporofito, y el gametofito es muy reducido. Sin embargo, en las briofitas, el esporofito suele ser mucho más reducido, adherido y dependiente del gametofito durante su desarrollo, en resumen, presentan alternancia de generaciones, en la que predomina el gametofito (Fotosintético) sobre el esporofito (Mauseth, 2003; Raven *et al.*, 2005, Delgadillo-Moya, 2014).

Los briofitos son un grupo ampliamente distribuido con ~22,000 especies agrupadas en 1,000 géneros, que se dividen en tres grupos principales: Hepáticas (clase *Hepatophyta*), Antoceros (clase *Anthocerophyta*) y Musgos (clase *Bryophyta*) (Nikishiyama & Kato, 1999; Nikishiyama *et al.*, 2004; Shaw & Renzaglia *et al.*, 2004). Los musgos se encuentran en casi todo el mundo (a excepción de los mares y los desiertos extremos), crecen sobre el suelo, troncos de árboles y rocas, su tamaño varía desde unos pocos milímetros hasta 30 cm (aunque el briofito promedio va de 1.0 a 5.0 cm) y su coloración se encuentra desde el verde al negro e inclusive incoloro (Buck & Golfines, 2002; Nishiyama *et al.* 2004; Shaw & Renzaglia, 2004; Glime, 2006).

Musgos (*Bryophyta*)

Los musgos son plantas no vasculares que poseen un cuerpo que absorbe y pierde agua fácilmente, y tiene la capacidad de tolerar la desecación y recuperarse después de largos períodos de sequía (*poiquilohídricos*) (Goffinet *et al.*, 2009). Como plantas primitivas. Los musgos no tienen raíces, carecen de un sistema vascular y transportan el agua externamente por capilaridad, los musgos se reproducen por esporas (Barrera & Osorio, 2008; Moores *et al.*, 1998).

Los musgos son el segundo grupo más grande de plantas continentales, después, de las angiospermas, comprenden entre 18,000 (Shaw & Renzaglia *et al.*, 2004) y 25,000 (Glime, 2006) especies conocidas. En México se registra la presencia de aproximadamente 960 especies, lo que corresponde a un 4.25% de la riqueza de los musgos conocida en el mundo. Gran parte del territorio nacional todavía no se ha explorado; por lo que, es probable que el número de especies sea más elevado (Gálvez & Sánchez-González., 2006).

El caulidio del gametofito de los musgos puede ser erecto o postrado y medir desde milímetros hasta varios centímetros de tamaño. Además de los rizoides, los caulidios pueden tener estructuras fotosintéticas y/o de protección. Los filidios con frecuencia presentan distintos arreglos sobre el caulidio, la costa de estas puede ser variable: única, doble, con crestas, bifurcada, llegar al ápice o a la mitad de la filidio, puede ser bien marcada o ligeramente, son uní- o pluriestratificadas y sus células varían en tamaño, forma y ornamentación (Mauseth, 2003; Strasburger *et al.*, 2004).

Un musgo comienza a desarrollarse a partir de una espora haploide, la cual germinará para producir el Protonema, que es una etapa, filamentosa, muy corta que genera al gametofito que a su vez se diferenciara en *caulidios* (tallos), *filidios* (hojas) y *rizoides* (raíz) (Figura 1). En las ramas o caulidios se desarrollan los órganos sexuales de los musgos, en los femeninos (conocidos como arquegonios) se forma la ovocélula y están protegidos por un grupo de filidios modificadas conocidas como periquéales. En los órganos masculinos (anteridios) se originan las células espermáticas o anterozoides que fecundarán la ovocélula para formar el cigoto. Los musgos pueden ser monoicos o dioicos (Figura 2) (Buck & Goffinet, 2002).

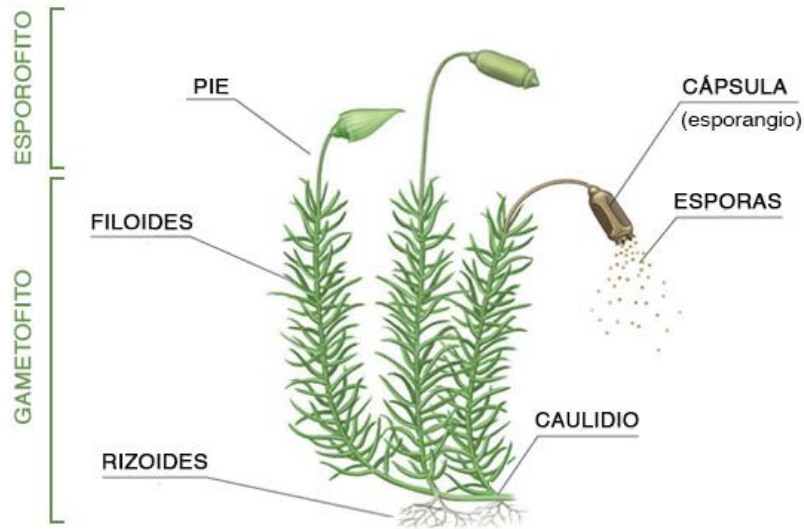


Figura 1. Estructura anatómica de los musgos.

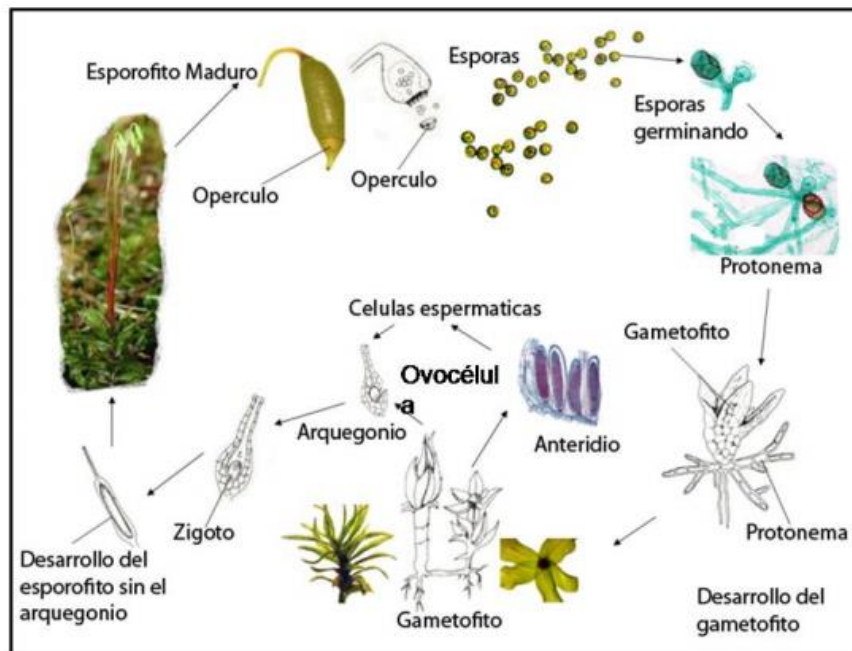


Figura 2. Ciclo de vida de los musgos.

Tradicionalmente, los musgos son divididos en tres clases: *Sphagnopsida*, *Andreaeopsida* y *Bryopsida* (Sharp *et al.*, 1994); sin embargo, los estudios morfológicos, anatómicos y moleculares surgió una nueva propuesta de clasificación, la cual los divide en seis clases: *Takakiopsida*, *Andreaebryopsida*, *Polytrichopsida* y *Bryopsida* (Buck & Goffinet, 2002; Glime, 2006).

Los musgos presentan tres estructuras vegetativas que son análogas a las partes de las plantas superiores, las cuales son:

a) **Rizoides**, estructuras pluricelulares que, como las raíces, sirven como órganos de fijación al sustrato. Además, actúan como estructuras capilares que favorecen la conducción externa del agua, estos en algunas especies pueden llegar a medir algunos centímetros, aunque por lo general miden de 4 a 15 mm.

b) **Caulidios**, estructuras de soporte análogas a los tallos, los cuales sujetan los rizoides y los filidios. En la parte interna del caulidio puede diferenciarse el cordón central, que está formado por células de pequeño diámetro alargadas que conducen agua llamados *hidroides*. Miembros de la familia *Polytrichaceae* presentan células denominadas *leptoides* que conducen metabolitos. Las ramificaciones se generan a partir de células de la epidermis del caulidio.

c) **Filidios**, estructuras pluricelulares generalmente monoestratificadas, con la presencia de una nervadura central de mayor grosor denominada *costa*. Los filidios se encuentran en acomodos de tres o más hileras en forma de espiral en algunos casos complanado (aplastado o comprimido a un plano) o dístico (alternado en dos hileras opuestas). Las células ubicadas en los márgenes basales presentan una diferenciación de color y forma de las demás células foliares a las cuales se les denomina células alares.

El **esporofito** es la estructura, generadora de esporas, dependiente del gametofito el cual, de acuerdo con el tipo de crecimiento existen tres clasificaciones: *Acrocárpico* (en estos el esporofito crecen en el ápice del caulidio y, generalmente, son erectos), *Pleurocárpico* (producen el esporofito de manera lateral a partir de una yema periquecual o una rama corta especializada) y *Cladocárpico* (el esporofito crece en el ápice de las ramas cortas laterales del caulidio principal). Los esporofitos son morfológicamente sencillos, los más complejos

constan de: un pie (a través del cual toman los nutrientes del gametofito), un eje alargado (seta) y un esporangio terminal (capsula). Esta capsula contiene varias estructuras que ayudan a la dispersión de las esporas, los cuales tienen valor taxonómico, los principales son: **peristoma**: estructura circular ordenada en una hilera simple o doble (raramente múltiple) de dientes en números pares, ubicada en la boca de la capsula y, **opérculo**, estructura en forma de tapa que cubre el peristoma (Delgadillo, 1999).

Antecedentes

Importancia de los musgos

Los musgos son de suma importancia ya que su valor económico es destacable porque se emplean como combustible (en particular la *turba*, que se puede denominar como un microecosistema formado por musgos del género *Sphagnum*, principalmente), en horticultura, en la absorción de aceites o como fuente de compuestos químicos. Ecológicamente, los musgos colaboran en la estabilización de las capas más superficiales del suelo y pueden colonizar rocas y suelos; participan en el reciclaje de nutrientes; en la producción de biomasa; en la fijación de carbono y, son capaces de regular el flujo hídrico. Por otro lado, se han empleado con fines medicinales y como bioindicadores (Delgadillo & Cárdenas, 1990; Hallingbäck *et al.*, 2000; Glime, 2006)

Los musgos intervienen en el intercambio de carbono y en el mantenimiento de la temperatura de los bosques (De Lucia *et al.*, 2003). Ecológicamente, los musgos se pueden utilizar como indicadores de calcio y de la cantidad de nutrientes en el agua, son buenos indicadores de lluvia ácida y del pH en los suelos. Algunos géneros inhiben la erosión de los suelos gracias a su forma de crecimiento (Saxena & Harinder, 2004).

Desde hace más de 30 años, los musgos son utilizados para diagnosticar niveles de toxicidad en el ambiente; por lo que, se consideran *bioindicadores de contaminación*. Los musgos epífitos son sensibles al dióxido de azufre (SO₂) y a otros contaminantes volátiles que causan graves daños a plantas y animales, debido a que los gametofitos de los musgos carecen de cutícula y obtienen sus nutrientes en solución a través de todo el cuerpo (Rio, 2017). Así también, los musgos sirven como indicadores de depósitos minerales, absorbiendo muchos de los elementos que se encuentran en alta concentración en el sustrato; su análisis

químico para la detección de dichos elementos es más confiable que el análisis de los sustratos (Delgadillo, 1990; Davila Bernal, 2020).

Los musgos son utilizados para describir el nivel de contaminación por compuestos orgánicos, como el petróleo y sus derivados a nivel atmosférico. Este tipo de biomonitorio se realiza con “bolsas de musgo” (*Moss bag*), en las cuales, el musgo es cultivado de manera *in vitro* permitiendo el crecimiento acelerado del organismo durante la absorción del contaminante (Gómez, 2016).

También, los musgos son empleados para conocer y monitorear los niveles de contaminación a nivel edáfico, ya que, son capaces de captar y concentrar los componentes que se encuentran en el sustrato que los rodea (Maija, 2003). Saalema et al. (2003) compararon la capacidad de fitoextracción de metales pesados y de dióxido de azufre en tres clases vegetales (musgos, líquenes y coníferas) para conocer la extensión de la contaminación que se da por una planta metalúrgica ubicada en Finlandia, cerca de un bosque boreal. Sus resultados remarcan que los musgos son la mejor clase vegetal para el biomonitorio y acumulación de contaminantes, a pesar de que dependen de la acidez del suelo, cantidad de lluvia, altitud, así como dirección y fuerza del viento. Por otro lado, Flores-Ortega et al. (2013) mencionan que los musgos son excelentes para el biomonitorio de suelos contaminados con metales pesados, sus resultados remarcan la capacidad de absorción del arsénico (As) en comparación con otros metales pesados.

Balabanova et al. (2017) describen la importancia que tienen dos especies de musgos (*Hypnum cupressiforme* y *Camptothecium lutescens*) como bioindicadores de la dispersión de contaminantes producidos por una mina de Zinc (Zn) y Plomo (Pb), a una distancia promedio de 50 Km desde la mina. Con lo cual, se confirma la capacidad que tienen los musgos para la bioextracción de diferentes elementos potencialmente tóxicos (EPT), los cuales son metales esenciales y no esenciales, que se encuentran a grandes concentraciones, o en excedente con respecto a los intervalos fisiológicos que permitan el adecuado funcionamiento metabólico del organismo como Cd, Cu, Hg, Pb, y Zn (González-Mendoza, 2008; Balabanova et al., 2017).

Justificación

Los musgos al ser plantas con la capacidad de absorber los diversos componentes químicos de su ambiente circundante son considerados indicadores adecuados para describir el estado en el que se encuentran los ecosistemas impactados por la contaminación. Además; ~~los musgos~~ son capaces de promover la formación y la estabilidad del suelo, y de ayudar a la germinación de algunas plantas leñosas (p. ej. *Cupressus* y *Pinnus*) (Gómez, 2016; Balabanova, 2017).

Durante recorridos exploratorios en el jal minero “La Concha” durante la época de lluvia, se observó la presencia de diferentes “tapetes” de musgos; los cuales, dependiendo de su ubicación, mostraban diferencias en la coloración del cuerpo vegetal y en el sustrato en que se encontraban, por lo que, se realizó la colecta de diferentes ejemplares.

Debido a los niveles de contaminación que presentan los jales mineros, se ha hecho mención que es prácticamente imposible que organismos vegetales tengan la capacidad de colonizarlos (Armienta *et al.*, 2008); sin embargo, ha sido reportada la presencia de diferentes plantas en los jales del municipio de Taxco (Gómez-Bernal *et al.*, 2010). Hasta el momento, la falta de información y de registros sobre la vegetación presente en los jales de la zona minera del estado de Guerrero es escasa y no considera la presencia de los musgos; estos al ser considerados plantas formadoras de suelos, son capaces de alentar la sucesión ecológica (Arévalo 2012), por lo que, se procedió a la descripción del potencial de extracción de EPT de los musgos que habitan el jal “La Concha”, con lo cual, se podrá describir el papel que podría tener este grupo de organismos en la estabilización de los contaminantes del sitio, dando pauta para el diseño de estrategias que ayuden a la biorremediación del sitio.

Planteamiento del Problema

La industria de la minería ocasiona grandes problemas ambientales, debido a la liberación de elementos potencialmente tóxicos que pueden ocasionar diversos problemas ambientales y de salud pública. Por lo que, es importante buscar alternativas naturales que ayuden a mitigar el impacto de las actividades antropogénicas. Por esta razón, planteamos la siguiente pregunta:

¿Los musgos presentes en el jal “La Concha” son capaces de estabilizar sitios contaminados con una concentración alta de EPT y con acidez extrema?

Hipótesis

Los musgos al ser plantas sin cutícula tienen la capacidad de absorber una gran cantidad de los contaminantes que los rodean, dada esta cualidad, son considerados organismos bioindicadores y biorremediadores. Por lo cual, se espera que los musgos que colonizan el jal “La Concha” tengan la capacidad de estabilizar los metales pesados que han quedado disponibles por acción del Drenaje Acido de Mina (DAM), siendo una alternativa para la remediación de estos sitios contaminados.

Objetivos

General

Evaluar el potencial de bioextracción de elementos potencialmente tóxicos por briofitas asociadas al jal minero “La Concha”, Taxco, Guerrero.

Particulares

1. Identificar taxonómicamente los musgos asociados al jal minero “La Concha”.
2. Caracterizar la composición química del sustrato en los que se encuentran los diferentes musgos colectados del jal minero “La Concha”.
3. Caracterizar la composición química (N, P, S, C) de los musgos colectados del jal minero “La Concha”.
4. Cuantificar los elementos potencialmente tóxicos (Fe, Cu, Zn, Pb, Cd, As) en el sustrato y en la biomasa de los musgos que habitan en el jal minero “La Concha”.

5. Comparar la composición química del sustrato con la composición del musgo asociado, para conocer su potencial de bioextracción y la estequiometría de la relación sustrato-musgo.

Zona de Estudio

El municipio de Taxco, en el estado de Guerrero, se encuentra entre los paralelos $18^{\circ} 21'$ y $18^{\circ} 41'$ de latitud norte; los meridianos $99^{\circ} 25'$ y $99^{\circ} 47'$ de longitud oeste, a una altitud de 700 a 2,600 m (Figura 3). Colinda al norte con los municipios de Tetipac, Pilcaya y el estado de Morelos. Al este con el estado de Morelos y el municipio de Buenavista de Cuéllar, y al sur con los municipios de Buenavista de Cuéllar, Iguala de la Independencia, Teloloapan e Ixcateopan de Cuauhtémoc. Al oeste con los municipios de Ixcateopan de Cuauhtémoc, Pedro Ascencio Alquisiras y Tetipac. Su extensión territorial ocupa el 1.02% de la superficie del estado, cuenta con 145 localidades y una población total de 108,416 habitantes (INEGI, 2009, SEDESOL, 2017).

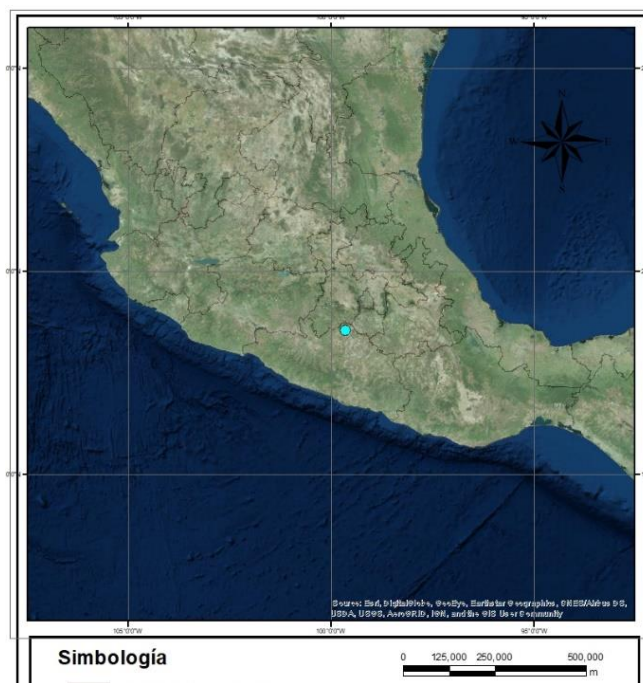


Figura 3. Mapa de localización de Taxco de Alarcón Guerrero. El punto en color turquesa representa la ubicación de la zona de estudio.

El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (26.42%), semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (25.45%), cálido subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (20.86%), cálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (15.93%), semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (11.27%) y semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (0.07%), con un rango de precipitación de 800–1 500 mm (INEGI, 2009).

Taxco de Alarcón se encuentra dentro de la Sierra Madre del Sur (100%); el 50.66% del territorio forma parte del sistema de Sierras y Valles Guerrerenses, mientras que el 49.34% forma parte de la Depresión del Balsas. Perteneciendo a la región Hidrológica del Balsas, particularmente a la cuenca Río Balsas–Mezcala (77.73%) y Río Grande de Amacuzac (22.27%), a la subcuenca Río Cocula o Iguala (77.23%) y Río Alto Amacuzac (22.27%). Presenta ríos permanentes y de temporal. En cuanto a edafología presenta 8 tipos de suelos dominando el Luvisol con 33.55%, seguido de Leptosol (30.65%), Phaeozem (21.76%), Calcisol (4.54%), Cambisol (4.25%), Kastañozem (1.58%), Andosol (0.54%) y Vertisol (0.50%) (INEGI 2009).

El jal minero “La Cocha” está ubicado en el municipio de Taxco, a un costado de la mina con el mismo nombre, se encuentra en la comunidad de “El Fraile”, a una distancia de tres kilómetros al norte de la ciudad, se encuentra cerrada debido a una huelga iniciada en el 2007 (Figura 4).

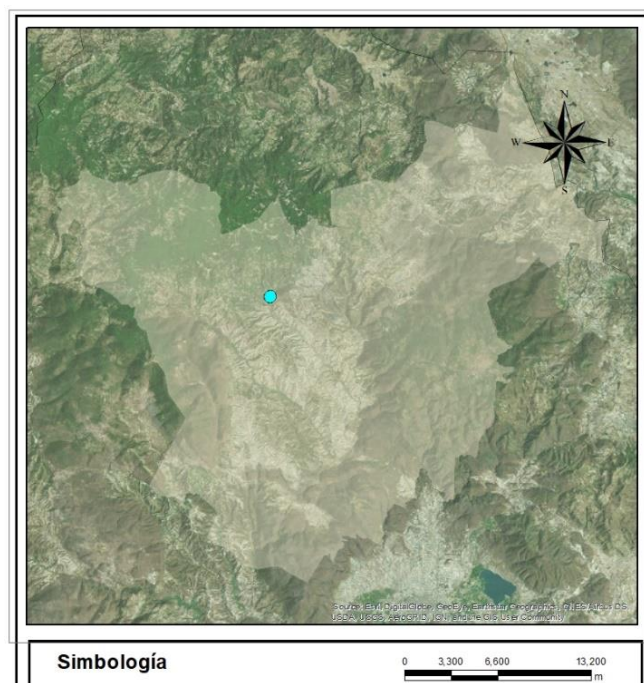


Figura 4. Ubicación de la mina y el jal minero "La Concha", Taxco Guerrero.

Talavera et al. (2005) realizaron un estudio para conocer la mineralogía y la geoquímica de seis jales presentes en Taxco: los cuales presentan altas concentraciones totales de Ag (9.5-74.2 mg/kg), Cd (1.0-780 mg/kg), Cu (71.8-1320 mg/kg), Fe (2.49-25.1%), Mn (18.6-13 800 mg/kg), Pb (780-43 700 mg/kg), V (2.0- 127 mg/kg), Zn (380->10 000 mg/kg) y As (19.0-11 800 mg/kg). Su investigación indica que la oxidación de los sulfuros y la generación de DAM están acompañados por procesos de disolución de otras fases, de neutralización por la calcita, la reprecipitación de fases secundarias y de procesos de adsorción; procesos responsables de la movilidad y disponibilidad de metales en los desechos mineros de Taxco. Por otro lado, Talavera et al. (2006) realizaron un monitoreo anual donde describen cómo se da la neutralización de los lixiviados ácidos por medio de la jarosita, un mineral secundario que se encuentra dentro del mismo jal minero, con el cual, los pH ácidos pueden llegar a la neutralidad (6.6 a 7.1); también mencionan el problema hídrico que ocasionan los jales mineros, dado que el agua es utilizada en uso doméstico.

En 2010, fue realizado un enlistado de la vegetación asociada a los jales mineros de Taxco (Gómez-Bernal *et al.*, 2010). Este estudio se enfoca en la identificación de los árboles,

arbustos y herbáceas presentes en los jales con la finalidad de poder conocer y utilizar a las plantas nativas como alternativa de biorremediación. Posteriormente, Méndez-Ramírez y Armienta (2012) realizaron un estudio para determinar las concentraciones y especies químicas disueltas en el Río Taxco que pudieron ser aportadas por los residuos mineros presentes en la zona. La cercanía de los jales mineros a los ríos de la zona ocasiona una aportación grande de metales pesados (Fe, Zn, Pb, Cu y Cd, principalmente), debido a los procesos de erosión hídrica y eólica. Resaltan que las concentraciones de metales son mayores a los límites establecidos en las normas ecológicas y la influencia de los jales en la alteración de las condiciones fisicoquímicas del agua del Río Taxco; lo cual, ha ocasionado que este río no pueda ser utilizado como fuente de agua potable ni para riego agrícola.

Método

Colecta e identificación taxonómica de los musgos asociados al jal.

Se realizó un recorrido exploratorio en el jal minero “La Concha”, tomando más importancia a las zonas con mayor humedad, que son los sitios con probabilidad de encontrar la presencia de musgos. La zona completa fue georreferenciada empleando un GPS, marca Garmin, modelo Xtrex. De igual manera se georreferenció la ubicación de los musgos colectados, realizando un muestreo exploratorio único, durante la época húmeda del año (de agosto del 2017 a enero del año 2018), la selección de este periodo se debe a que los musgos se encuentran fisiológicamente activos y presentan órganos sexuales, necesarios para su identificación taxonómica.

La colecta se realizó siguiendo los criterios propuestos por Flores-Ortega et al. (2013), tomando las muestras en forma de tapetes de musgo de 25 x 25 cm con alrededor de 5.0 a 15 cm de sustrato, almacenándolas en bolsas herméticas (tipo “Ziplock”) para mantener la humedad de las muestras. Además, siguiendo el método sugerido por Delgadillo (1990), se colectaron tapetes de 5.0 x 5.0 cm que fueron almacenados en bolsas de papel para su herborización y posterior identificación taxonómica.

Las muestras fueron transportadas al laboratorio en una caja de plástico cubierta, evitando el contacto con la luz. La identificación taxonómica de los musgos se realizó con

claves dicotómicas especializadas en briofitas, principalmente “El manual de *Briophytas* de México de Delgadillo, 1999”.

Caracterización química del sustrato asociado a los musgos.

El sustrato adherido a los musgos fue retirado empleando utensilios de plástico. Posteriormente, se realizó el secado de las muestras a temperatura ambiente y, se maceró en un mortero de ágata para la cuantificación de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT), con un mortero de porcelana para el resto de los análisis químicos. Las muestras fueron tamizadas de acuerdo con lo requerido para cada uno de los análisis químicos.

Para la cuantificación de los componentes en el tejido vegetal, los organismos fueron lavados con agua destilada tres veces, el agua de lavado se recuperó y se evaporó a Temperatura ambiente el residuo se incorporó a la muestra correspondiente de sustrato.

Los análisis del sustrato se realizaron siguiendo los métodos establecidos en la NOM-021-SEMARNAT-2000, principalmente. El pH fue cuantificado siguiendo el apartado AS-02, en el cual se emplean 10g de muestra sólida en un frasco de vidrio, se le agregan 20mL de agua destilada. La muestra fue homogenizada por agitación manual empleando una varilla de vidrio, en intervalos de 5 min durante 30 min, se deja reposar por 15 min, transcurrido este tiempo se debe volver a agitar para introducir el electrodo a la mezcla y registrar la lectura. El pH fue cuantificado con un potenciómetro marca *Thermo scientific* modelo H03062.

La determinación del contenido de fósforo (P) se realizó por medio de dos métodos, de acuerdo con los valores de pH obtenidos en las muestras de sustrato. El primer método utilizado fue para suelos neutros y alcalinos (AS-10; método de *Olsen*), en el cual a 2.5g de sustrato, tamizado por una malla de 2.0mm, fueron colocados en tubos de polietileno, se adicionaron 50mL de una solución de bicarbonato de sodio (NaHCO_3 , 0.5 M), se procedió a agitar durante 30 min en agitador mecánico a 180 oscilaciones por min, se filtró la mezcla. A una submuestra de 5.0mL de suelo de la solución se le agregó 5.0mL de solución de ácido ascórbico y molibdato de amonio, se aforó a 50mL y se analizó a una longitud de onda de 882nm (espectrofotómetro marca UNICO, modelo LAUV2150S/NMKP12051205045). El segundo método utilizado fue el de *Bray & Kurtz* para suelos neutros y ácidos (AS-11, modificado al “Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios

contaminados”), en el que se emplearon 2.5g de muestra tamizado por una malla de 2.0mm y colocado en tubos de polietileno para adicionar 25mL de una mezcla de HCl y NH₄F para la extracción de P. Las muestras se agitaron por 5.0 min en un agitador mecánico a 180 oscilaciones por minuto, posteriormente se filtraron, se tomó una alícuota de 5.0mL para aforar a 50mL añadiendo 10mL de una solución de ácido ascórbico y molibdato de amonio. Las muestras fueron analizadas a una longitud de onda de 640nm (espectrofotómetro marca UNICO modelo LAUV2150S/NMKP12051205045).

El contenido de materia orgánica y el porcentaje de carbono orgánico se realizaron por el método *Walkley & Black* (AS-07), en el cual, se tomó una muestra de sustrato de 0.5g tamizado por malla de 0.5 mm y fue colocado en un matraz Erlenmeyer de 500mL para, posteriormente, adicionar 10mL de dicromato de potasio 1N agitando cuidadosamente, para humedecer la muestra. A continuación, se agregaron 20mL de ácido sulfúrico concentrado, se agito durante 1.0 min cuidadosamente y se deja reposar durante 30 min, transcurrido este tiempo se agregan 200mL de agua destilada y 5.0mL de ácido fosfórico concentrado y 10 gotas de indicador de difenilamina, se tituló con sulfato ferroso (FeSO₄, 1.0 M), hasta obtener un color verde esmeralda.

La determinación de sulfatos (SO₄²⁻) se realizó con el método de determinación de aniones solubles en el extracto de saturación (AS-20), en el cual, se realiza una pasta saturada con el sustrato y agua destilada. A 10mL de la solución resultante se le agregó 5.mL de la solución acondicionadora de glicerol y ácido clorhídrico, 0.2 |g de bromuro de calcio (BaCl₂•2H₂O). Las muestras se agitaron y se leyeron a una longitud de onda de 340 nm (espectrofotómetro marca UNICO, modelo LAUV2150S/NMKP12051205045).

Para conocer la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se utilizó el método del Versenato (Reyes, 1996). En el cual, se empleó 1.0g del sustrato tamizado a 2.0mm, se realizaron tres lavados al sustrato con diferentes soluciones primero con CaCl₂ 1.0N, del cual se desecha la solución que pasa a través de la muestra. Posteriormente, con alcohol etílico al 96%, se realizaron lavados y se finaliza con los tres lavados de NaCl 1.0 N, de los cuales la solución resultante se valora con una solución de EDTA 0.02N.

Análisis de la composición química de los musgos.

Para los análisis químicos del tejido vegetal, se emplearon los métodos propuestos en el *Manual de Tejido Vegetal* (Sadzawka, 2004). Excepto el análisis de pH, el cual, consistió en agregar 10mL de agua destilada a un peso de 1.0g de musgo previamente secado a temperatura ambiente, se agito con una varilla de vidrio durante 5- θ min y, posteriormente, se introdujo el electrodo y se esperó a la estabilización del equipo (Steubing *et al.*, 2002). Se empleo un potenciómetro marca *Thermo scientific*, modelo H03062.

La concentración de carbono orgánico (CO) en el tejido vegetal se realizó por el método de calcinación, el cual consiste en colocar en una capsula de porcelana 1.0 g de musgo secado a temperatura ambiente y llevar a la mufla para la calcinación por 72 horas a 500°C. Posteriormente, se trató la muestra con una solución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$, 1.0 N) y, finalmente, se valoró con sulfato ferroso ($FeSO_4$, 1.0 M) (Sadzawka, 2004).

La concentración de fósforo total (Pt) en el tejido vegetal se obtuvo por el método colorimétrico del fosfo-vanadomolibdato, en el cual, la muestra se debe calcinar a 500°C durante 8 horas, dejar enfriar y agregaron 2.0mL de agua para humedecer las cenizas y 10mL de ácido clorhídrico 2.0M. Se filtra el contenido de la cápsula y se afora a 50mL. Para el desarrollo de color se toma una alícuota de 1.0L, se le añadieron 4.0mL de una solución de nitro-vanadomolibdato, se mezcla y se deja reposar por una hora. Las muestras son analizadas a una longitud de onda de 466nm con un espectrofotómetro marca UNICO, modelo LAUV2150S/NMKP12051205045.

Cuantificación de los elementos potencialmente tóxicos (EPT).

El análisis de la concentración de EPT (cobre, Cu; zinc, Zn; hierro, Fe; plomo, Pb y, cadmio, Cd) en el sustrato y en el tejido vegetal se realizó por el método de digestión di-ácida (modificada), el cual consiste en pesar 0.3g de sustrato y 0.5g de materia vegetal, ambos casos previamente tamizados con una malla de 2.0mm. A cada muestra se les agrega 10mL de una mezcla 1:3 de ácido nítrico concentrado y ácido sulfúrico concentrado. Se dejó reposar durante 24 horas, a este periodo se le denomina predigestión. Pasado este tiempo, se calentaron las muestras hasta que la mezcla se volvió transparente, se dejan enfriar, se aforan a 50mL y se filtran para posteriormente ser analizadas por el espectro de absorción atómica

(marca Varían, modelo AA1475), empleando una lámpara de cátodo hueco para cada elemento y llama con mezcla de gases de aire/acetileno.

Determinación del potencial de bioextracción de EPT.

Se realizó un análisis comparativo de la concentración de los EPT en el sustrato y en la biomasa del musgo para calcular el Potencial de bioextracción ($PB = \text{concentración de EPT en biomasa} / \text{concentración de EPT en sustrato}$), con lo que se estableció su potencial de biorremediación o estabilización. Dicha información, será vinculada a la estequiometría del sustrato y del tejido vegetal para describir la presión que ejercen las condiciones de estrés del sitio en el desarrollo de los musgos.

Análisis estadísticos.

Una vez obtenidos los resultados de los análisis anteriores, se procedió a realizar los análisis estadísticos con dos programas especializados: Statgrafics (Centurion) y SPSS 24 (IMB). En los cuales, se determinó el índice de correlación de Pearson y se realizó un análisis de componentes principales (ACP).

Resultados

Las muestras se colectaron de manera aleatoria en cada uno de los sitios con presencia de musgos; los cuales, se caracterizaban por tener una humedad óptima para el crecimiento de estos organismos (Figura 5).

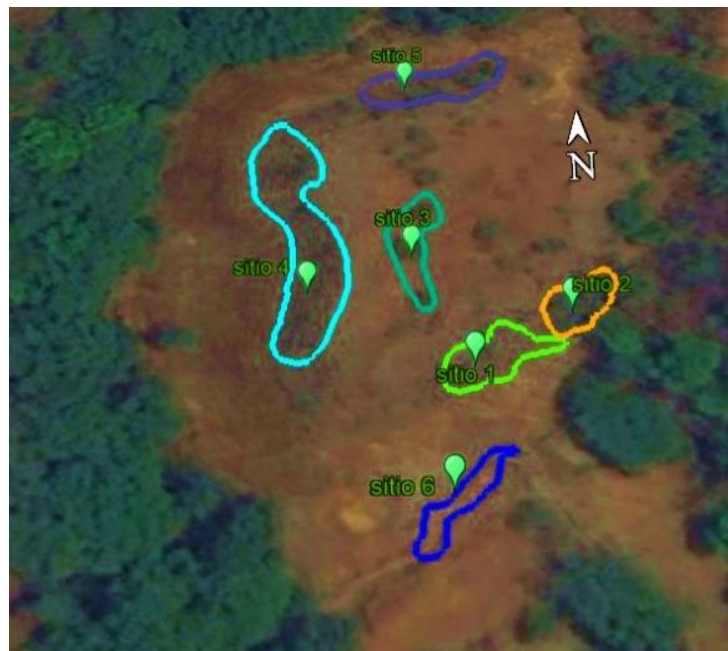


Figura 5. Ubicación de sitios de muestreo.

Taxonomía de los musgos colectados en el jal “La Concha”.

Los musgos colectados en el jal minero “La Concha” fueron identificados con el apoyo del Dr. Claudio Delgadillo Moya del Instituto de Biología, UNAM.; las determinaciones taxonómicas obtenidas fueron las siguientes:

- *Anoetangium aestivum* (Hedw.) Mitt.
- *Brachymenium systylium* (Müll. Hal.) A. Jaeger.
- Bryaceae (inmaduro, etiolado y sin esporofitos).
- *Bryum argenteum* Hedw.

- *Bryum argenteum* Hedw. + *Didymodon rigidulus* var. *Icmadophilus* (Schimp. ex Müll. Hal.).
- *Gymnostomum* (estéril y poco desarrollado) + *Hyophila involuta* (Hook) A. Jaeger
- *Hyophila involuta* (Hook) A. Jaeger.
- *Scopelophila lingulata* (Spruce) Spruce + *Hyophila involuta* (Hook) A. Jaeger

Composición Química del Sustrato del jal “La Concha”

Se entiende por sustrato a todo material sólido de origen orgánico o mineral diferente al suelo, el cual provee un medio para el crecimiento a las plantas, pudiendo o no intervenir en la nutrición del cultivo (Frouz *et al.*, 2016). Las características de los sustratos dependen de múltiples factores, pero de manera general, deben favorecer el crecimiento y el desarrollo de las plantas sin importar su origen. Para que un sustrato cumpla con estas funciones deberá tener un pH aceptable, una moderada capacidad tampón, baja salinidad, buena retención de humedad, buena aireación y drenaje. Las propiedades químicas en el sustrato son importantes ya que de ellas dependerá en gran parte la disponibilidad de nutrientes (Reboredo *et al.*, 2013). Los datos obtenidos mediante los análisis se resumen en la Tabla 1, en la cual se muestra el comportamiento que se tiene químicamente, tanto en el sustrato, como en la biomasa de los organismos.

Tabla 1. Características fisicoquímicas y concentración de elementos potencialmente tóxicos en sustrato y biomasa de los musgos del jal minero “La Concha”. MO = Materia Orgánica, CIC = Capacidad de Intercambio Catiónico, CO= Carbono Orgánico, Pt= Fosforo total, PBEPT = Potencial de Bioextracción de Elementos Potencialmente Tóxicos.

Briofita	Características Fisicoquímicas				Elementos potencialmente tóxicos				
	Sustrato		Biomasa		Sustrato mgKg ⁻¹		Biomasa mgKg ⁻¹		PBEPT
<i>Bryum argenteum</i>	pH	6.78-6.04			Fe	5763.06	Fe	4051.5	0.81
	SO ₄ ⁻²	0.09-0.16mgKg ⁻¹	pH	6.61-7.34	Pb	1246.62	Pb	5830.75	1.00
	PO ₄ ⁻³	0.77-8.84 mgKg ⁻¹	Pt	0.34-0.40 mgKg ⁻¹	Cd	48.19	Cd	0.25	0.50
	MO	0.10-1.0%	CO	4.0-9.0 %	Cu	107.71	Cu	21.03	0.33
	CIC	5-5.4			Zn	295.74	Zn	386.28	1.22
Bryaceae	pH	7.52-8.73			Fe	7999.81	Fe	5452	0.71
	SO ₄ ⁻²	0.10-0.07 mgKg ⁻¹	pH	8.10-9.62	Pb	1646.38	Pb	3676.84	0.45
	PO ₄ ⁻³	1.66 mgKg ⁻¹	Pt	0.17-0.80 mgKg ⁻¹	Cd	105.58	Cd	0.45	0.04
	MO	0.2-0.5%	CO	3.0-10.0%	Cu	161.90	Cu	20.00	0.13
	CIC	5-6.4			Zn	367.38	Zn	696.73	1.99
<i>Anoetangium aestivum</i>	pH	7.20-7.77			Fe	6497.01	Fe	4138	0.74
	SO ₄ ⁻²	0.12-0.07 mgKg ⁻¹	pH	7.75-8.36	Pb	1675.52	Pb	8425.18	1.38
	PO ₄ ⁻³	5.45 mgKg ^{-1z}	Pt	0.01-0.42 mgKg ⁻¹	Cd	91.00	Cd	0.60	0.04
	MO	0.43-0.52%	CO	8.0-9.0%	Cu	141.60	Cu	38.75	0.27
	CIC	6			Zn	539.84	Zn	803.97	2.22
<i>Gymnostomum+Hyophila involuta</i>	pH	7.18-8.63			Fe	5880.47	Fe	4559	0.80
	SO ₄ ⁻²	0.09-0.12mgKg ⁻¹	pH	7.02-9.20	Pb	2204.92	Pb	10134.37	1.79
	PO ₄ ⁻³	0.56-4.26mgKg ⁻¹	Pt	0.44-0.46 mgKg ⁻¹	Cd	47.28	Cd	0.76	0.13
	MO	0.8-0.26%	CO	5.0-6.0%	Cu	116.80	Cu	39.50	0.35
	CIC	7.2-17.4			Zn	272.48	Zn	736.66	2.71
<i>Bryum argenteum + Didymodon rigidulus</i>	pH	7.45-7.71			Fe	4127.21	Fe	4078	2.33
	SO ₄ ⁻²	0.10-0.14mgKg ⁻¹	pH	8.06-8.48	Pb	947.00	Pb	6485.37	3.41
	PO ₄ ⁻³	4.46-14.57mgKg ⁻¹	Pt	0.21-0.53 mgKg ⁻¹	Cd	32.70	Cd	0.73	0.33
	MO	0.69-0.95%	CO	8.0%-10.0%	Cu	94.25	Cu	35.00	0.39
	CIC	5.2-6			Zn	133.54	Zn	792.05	9.42
<i>Hyophila involuta</i>	pH	4.59			Fe	5156.05	Fe	5218	1.01
	SO ₄ ⁻²	457.19mgKg ⁻¹	pH	5.04	Pb	932.42	Pb	58.19	0.01
	PO ₄ ⁻³	5.45mgKg ⁻¹	Pt	0.19 mgKg ⁻¹	Cd	8.41	Cd	0.19	0.07
	MO	0.18%	CO	1.00%	Cu	107.78	Cu	2.12	0.01
	CIC	60.8			Zn	181.88	Zn	18.91	0.10
<i>Scopelophila lingulata + Hyophila involuta</i>	pH	7.18-8.20			Fe	4589.61	Fe	5308	1.16
	SO ₄ ⁻²	0.15-104.6mgKg ⁻¹	pH	7.74-8.87	Pb	1792.08	Pb	2577.11	0.54
	PO ₄ ⁻³	1.17-4.16mgKg ⁻¹	Pt	0.03-0.27 mgKg ⁻¹	Cd	61.85	Cd	0.60	0.05
	MO	0.16-0.87%	CO	14.0-19.0%	Cu	94.25	Cu	18.12	0.21
	CIC	6-41			Zn	341.01	Zn	428.50	1.27
<i>Brachymerium systylium</i>	pH	3.7-8.41			Fe	8531.57	Fe	4612	0.52
	SO ₄ ⁻²	0.10-272.8mgKg ⁻¹	pH	4.18-8.75	Pb	2258.34	Pb	5130.39	0.68
	PO ₄ ⁻³	17.31 mgKg ⁻¹	Pt	0.02-0.27 mgKg ⁻¹	Cd	115.30	Cd	1.24	0.23
	MO	0.38-0.69	CO	3.0-9.0%	Cu	188.95	Cu	15.89	0.09
	CIC	6.6-20.4			Zn	408.18	Zn	470.52	2.21

pH

El pH es la propiedad que determina la disponibilidad de los nutrientes (Osorio,2012). Un pH bajo puede ocasionar deficiencias de Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Boro (B), mientras que un pH por arriba de 6.5 pueden disminuir la disponibilidad de Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Zinc (Zn) y Cobre (Cu). En promedio, las muestras de sustrato analizadas del jal “La Concha”, presentaron un pH de 7.14; lo cual, describe una tendencia hacia la neutralidad. El valor máximo de pH denota un comportamiento medianamente alcalino (8.73), correspondiente al sustrato donde se ubicaba el ejemplar de *Bryaceae* (Br1), y el valor mínimo (pH = 3.7) describe un comportamiento fuertemente ácido, el cual, corresponde al sustrato del ejemplar *Brachymenium systylium* (Bs2) (Figura 6).

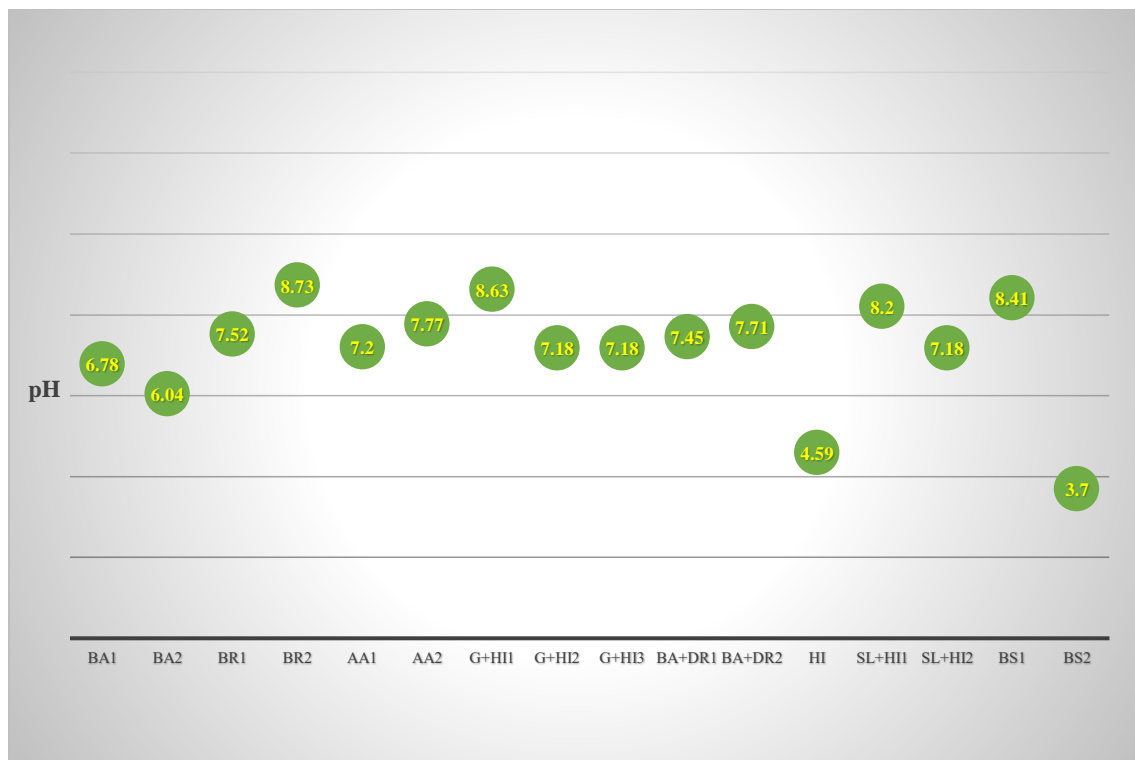


Figura 6. Valores de pH en el sustrato de los ejemplares de musgo colectados en el jal “La Concha”. Las siglas corresponden a abreviaciones de las determinaciones taxonómicas de cada ejemplar de musgo. Ba= *Bryum argenteum*; Aa= *Anoetangium aestivum*; Br= *Bryaceae*; G+Hi *Gymnostomum + Hyophila involuta*; Ba+Dr= *Bryum argenteum + Didimodon rigidulus*; Hi= *Hyophila involuta*; Sl+Hi= *Scopelophila lingulata + Hyophila involuta*; Bs= *Brachymenium systylium*.

Las muestras se colectaron en seis sitios diferentes, en los cuales los valores de pH varían de ácidos a básicos. En el sitio 6, el pH de las muestras vario de 8.41 a 3.7 (Figura 7), en dónde se identificó a *Brachymenium systylium*. El pH cuantificado en los sitios 2 a 5, se encuentran entre 7 y 9, y se catalogan como neutras o alcalinas, respectivamente. Para el sitio 1, se colecto una sola muestra y tuvo un pH de 6.78, catalogado como neutro-ligeramente ácido. Estos resultados reflejan la amplia variación de pH en el jal minero “La Concha”.

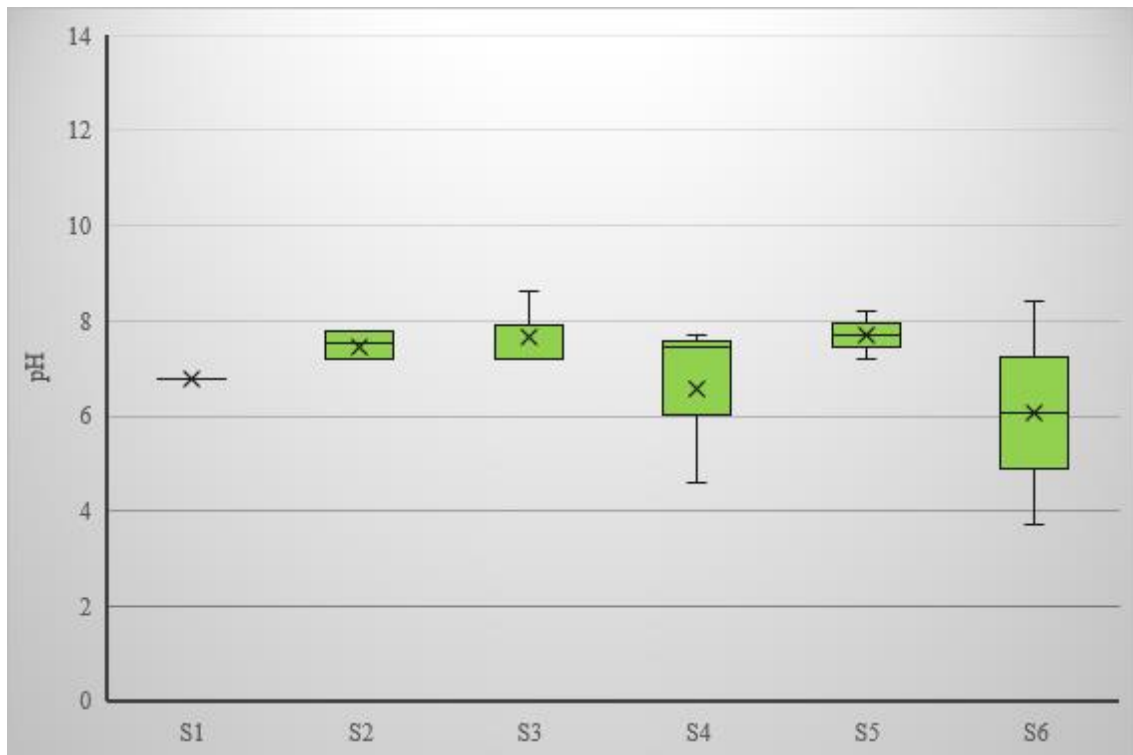


Figura 7. Cuantificación del pH en el sustrato por sitio de muestreo.

En relación con la variación del pH del sustrato asociado al rizoide de los grupos taxonómicos de musgos identificados (Figura 8), se observó que el sustrato con mayor variación de pH fue de *Brachymenium systylium* (de 3.70 a 8.41). En cambio, el sustrato de *Anoetangium aestivum* tuvo un valor neutral (pH = 7.4). Los sustratos donde se encuentran los musgos inmaduros de la familia Bryaceae, presentan un comportamiento básico débil (pH = 8.1). En el sustrato de *Hyophila involuta*, el pH es ácido (4.9), sin embargo, cuando esta se

encuentra en consorcio con *Gymnostomum* y *S. lingulata* el sustrato, cambia a tener un comportamiento alcalino débil.

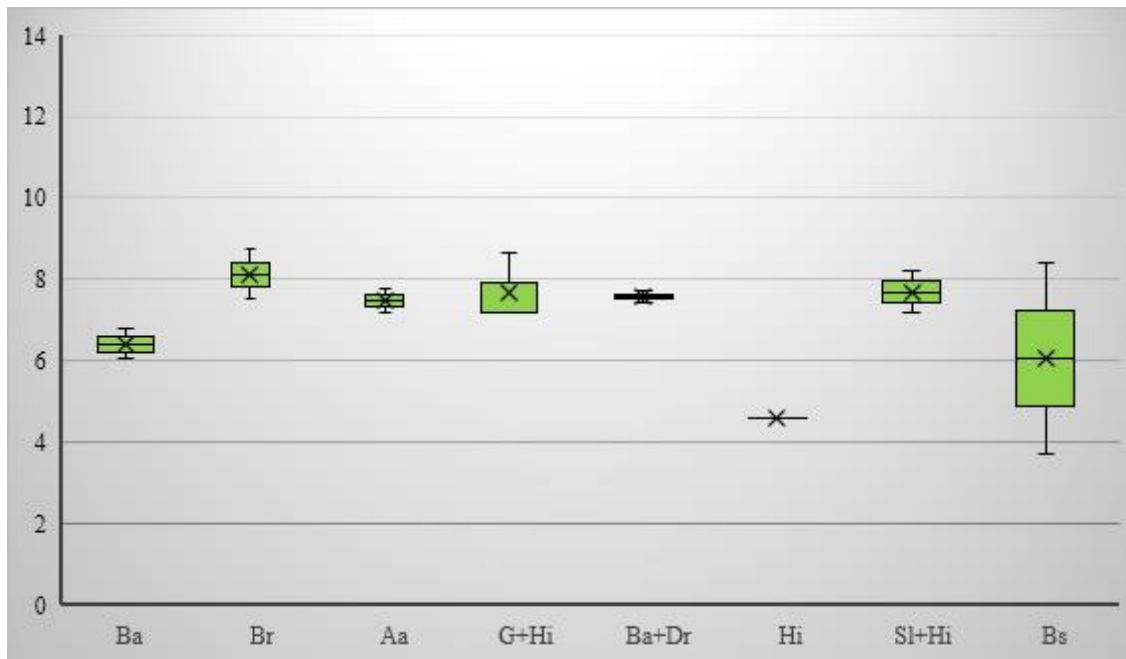


Figura 8. Variación del pH del sustrato asociado al rizoide de los grupos taxonómicos de musgos identificados. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo. *Ba*= *Bryum argenteum*; *Aa*= *Anoectangium aestivum*; *Br*= *Bryaceae*; *G+Hi* *Gymnostomum* + *Hyophila involuta*; *Ba+Dr*= *Bryum argenteum* + *Didimodon rigidulus*; *Hi*= *Hyophila involuta*; *Sl+Hi*=*Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; *Bs*= *Brachymerium systylium*.

Determinación de fosfatos (PO_4^{3-})

El fósforo es vital para el crecimiento y la salud de las plantas, es el tercer nutriente más importante, funciona como uno de los principales actores en la fotosíntesis, transportador de nutrientes y transmisor de energía. El fósforo también afecta a la estructura de la planta a nivel celular (Patiño *et al*, 2016; Palomares, 2021).

En la Figura 9, se muestra la variación en la concentración de fosfatos (PO_4^{3-}) en el sustrato asociado a los musgos colectados en el jal “La Concha”. La muestra de sustrato correspondiente al ejemplar de *Brachymerium systylium* (Bs1) mostró una concentración

de 17.31 mg Kg^{-1} de PO_4^{3-} ; siendo esta la mayor concentración cuantificada con respecto al resto de las muestras. La concentración mínima cuantificada correspondió a la muestra de sustrato del ejemplar *Bryum argenteum* (Ba1) ($0.77 \text{ mgKg}^{-1} \text{ PO}_4^{3-}$); sin embargo, la muestra Ba2, la cual corresponde a otro ejemplar de la misma especie, presenta una concentración de $8.84 \text{ mg Kg}^{-1} \text{ PO}_4^{3-}$. Para cuatro de las muestras, el método no fue el adecuado debido a que estas no presentan una concentración suficiente para ser detectada por el método de análisis, por lo cual son excluidas del gráfico.

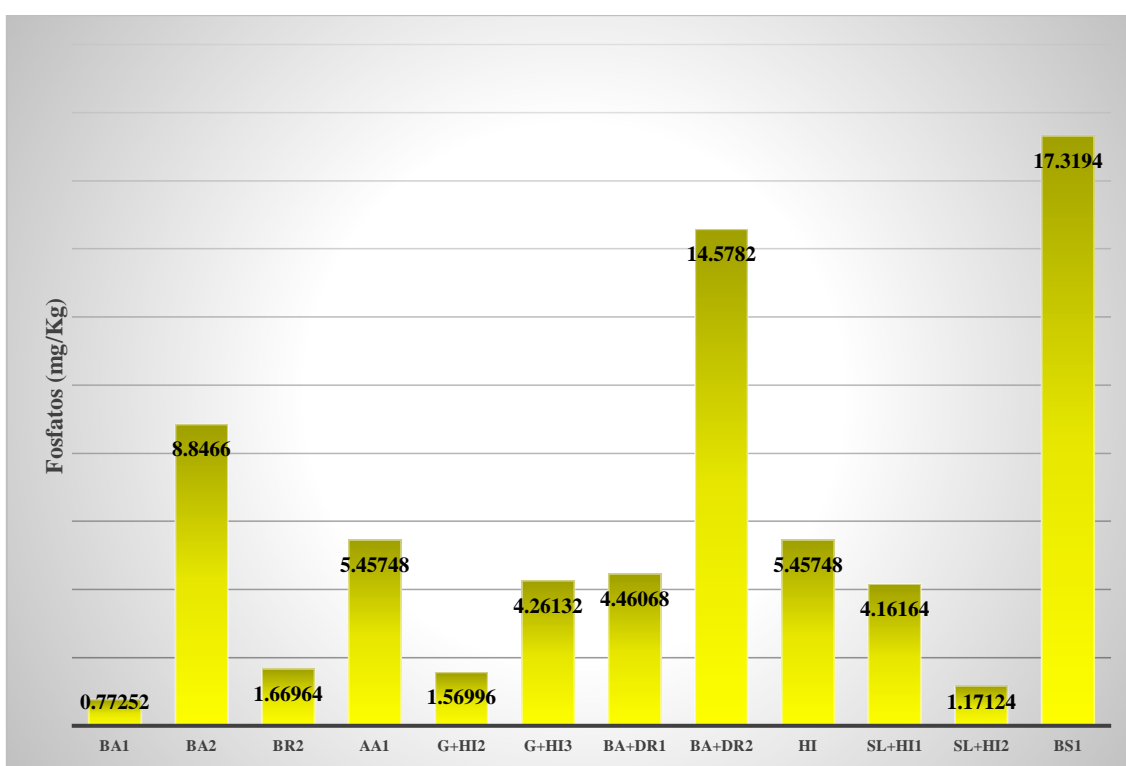


Figura 9 Concentraciones de fosfatos en el sustrato de los ejemplares de musgo colectados en el jal “La Concha”. Las siglas corresponden a abreviaciones de las determinaciones taxonómicas de cada ejemplar de musgo. Ba= *Bryum argenteum*; Aa= *Anoetangium aestivum*; Br= *Bryaceae*; G+Hi *Gymnostomum* + *Hyophila involuta*; Ba+Dr= *Bryum argenteum* + *Didimodon rigidulus*; Hi= *Hyophila involuta*; Sl+Hi= *Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; Bs= *Brachymenium systylium*.

Al agrupar las muestras por los sitios por muestreo (Figura 10), los sitios 1 y 6 son los que definen la concentración mínima y máxima, respectivamente. Sin embargo, en estos

sitios, hubo algunas muestras no se logró detectar el fósforo; por lo que, estos valores son de una muestra. El sitio 4, mostró una variación amplia, porque la concentración en los sitios muestreados estuvieron 4.46 y 14.57 mgKg⁻¹ PO₄³⁻. El sitio 2, tuvo una variación de 1.66 a 5.45 mgKg⁻¹ PO₄³⁻. El sitio 3, tuvo una variación de 1.57 a 4.26 mgKg⁻¹ PO₄³⁻. Finalmente, el sitio 5 tuvo concentraciones de 1.17 a 4.16 mgKg⁻¹ PO₄³⁻.

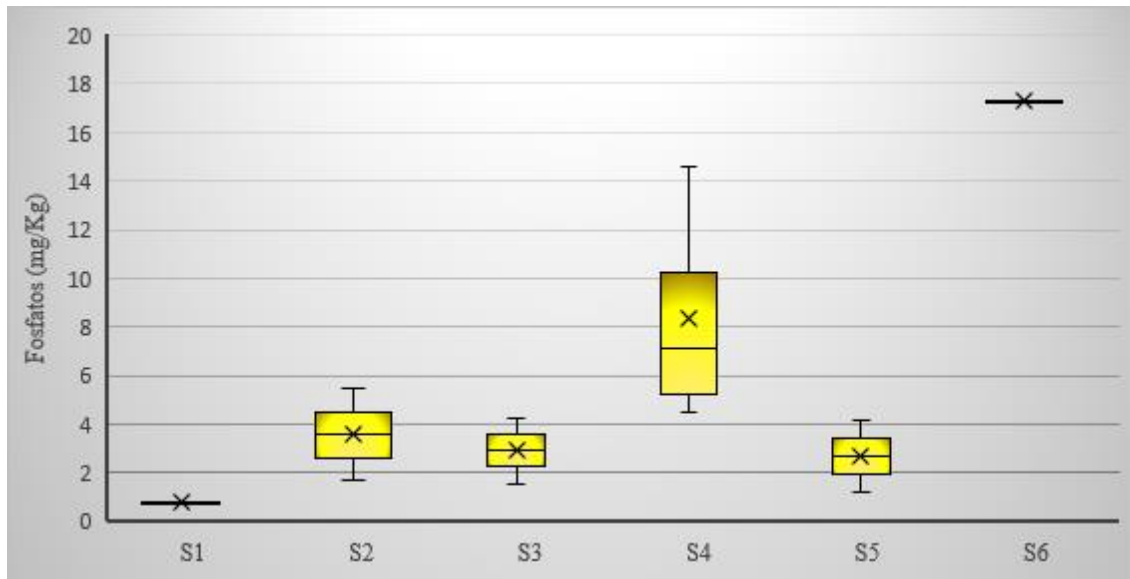


Figura 10. Concentración de fosfatos por sitio de muestreo.

En lo que respecta a la concentración de PO₄³⁻ agrupando las muestras por grupo taxonomico (Figura 11), de cuatro de ellos solo se pudo obtener el valor de una de las muestras (*Bryaceae*, *Anoectangium aestivum*, *Hyophila involuta*, *Brachymerium systylium*). Del resto de las muestras se observó que en donde se encuentran interactuando *Gymnostomum* + *Hyophila involuta* y *Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*, tienen concentraciones bajas de PO₄³⁻. Mientras que en la interacción *Bryum argenteum* + *Didimodon rigidulus* observaron las concentraciones más altas de este parámetro.

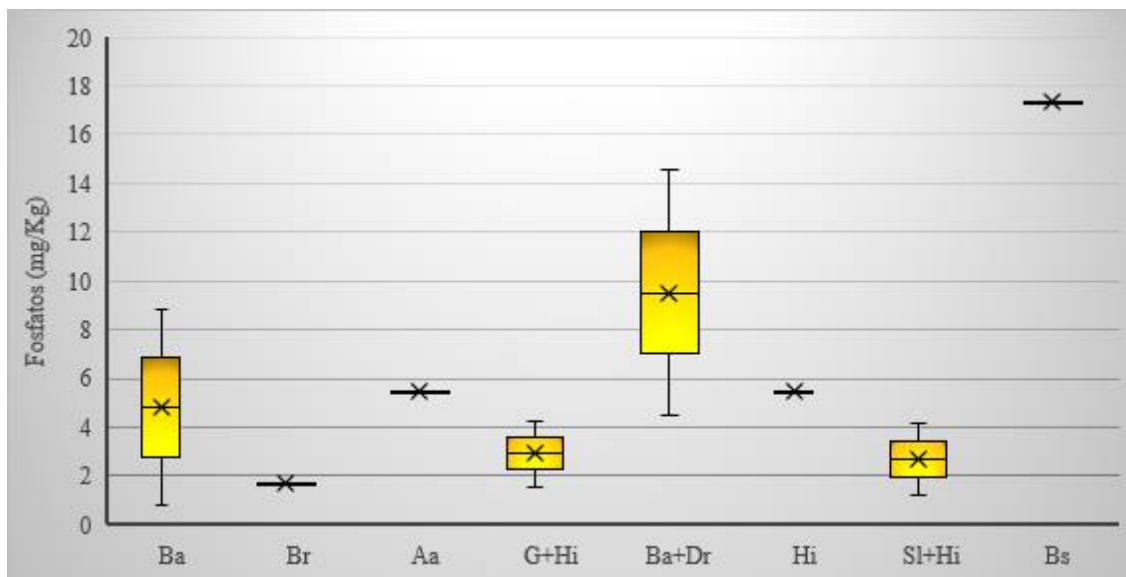


Figura 11. Variación de la concentración de fosfatos en el sustrato agrupado por grupo taxonomico de los musgos. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo. *Ba*= *Bryum argenteum*; *Aa*= *Anoetangium aestivum*; *Br*= *Bryaceae*; *G+Hi* *Gymnostomum* + *Hyophila involuta*; *Ba+Dr*= *Bryum argenteum* + *Didimodon rigidulus*; *Hi*= *Hyophila involuta*; *Sl+Hi*=*Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; *Bs*= *Brachymenium systylium*.

Contenido de materia orgánica (MO)

La materia orgánica (MO) representa la principal reserva edáfica de carbono y composición le otorga propiedades diferenciadas que la hacen responsable de actividades fundamentales en el suelo (Labrador, 2012). La MO representa del 95 al 99% del total del peso seco de los seres vivos, pero su presencia en los suelos suele ser escasa y son contadas las excepciones en las que supera el 2.0% (Navarro *et al.*, 1995). Una de las características descritas por Delgadillo (1999) es que los musgos son capaces de generar pequeños ecosistemas donde las bacterias y los mismos tejidos del musgo enriquecen los sustratos donde se desarrollan con MO.

La concentración promedio de MO en el sustrato del jal “La Concha” fue de 0.46% (Figura 12). La concentración mínima fue cuantificada en el sustrato del grupo *Gymnostomum* + *Hyophila involuta* (0.08% MO), a pesar de ser el sitio donde se encuentran establecidos árboles del género *Cupressus*. La concentración máxima de MO fue de 1.04%,

cuantificada en la segunda muestra del ejemplar *Bryum argenteum*; el cual, se encuentra en un sitio donde la cubierta vegetal es escasa y está dominada por musgos y helechos.

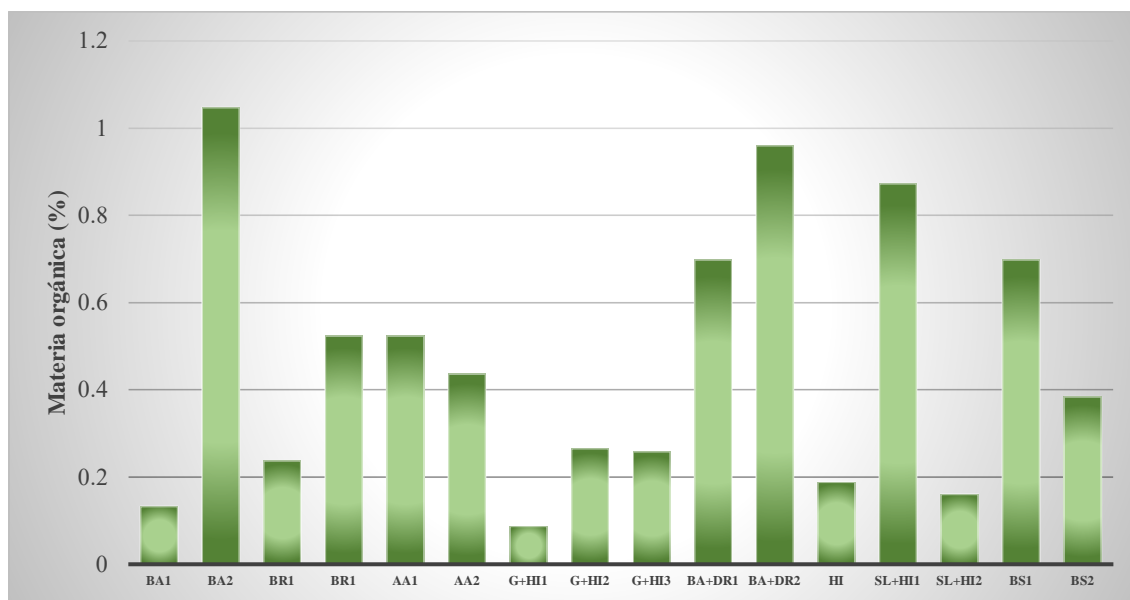


Figura 12. Porcentaje de materia orgánica (%MO) en las muestras de sustrato presentes en cada uno de los ejemplares de musgos colectados. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo:

Ba= *Bryum argenteum*; *Aa*= *Anoetangium aestivum*; *Br*= *Bryaceae*; *G+Hi* *Gymnostomum* + *Hyophila involuta*; *Ba+Dr*= *Bryum argenteum* + *Didimodon rigidulus*; *Hi*= *Hyophila involuta*; *Sl+Hi*=*Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; *Bs*= *Brachymerium systylium*.

La concentración de MO de los sustratos agrupados por grupo taxonómico (Figura 13), mostro que en las muestras pertenecientes a la especie de *B. argenteum* se encuentra la mayor variación de MO. En estas muestras es donde se cuantifico la mayor concentración de este parámetro; pero, a pesar de esto, (Navarro *et al*, 1995) dicho valor se considera como *muy bajo*. Por otro lado, el sustrato del complejo *Gymnostomum* + *Hyophila involuta* fue el que tuvo la menor concentración de MO; a pesar de que estos musgos fueron encontrados en una zona donde se ubican varios miembros del género *Cupressus*.

Finalmente, al comparar la concentración de MO por sitio de muestreo (Figura 14), se observó que los sitios 4 y 6 tuvieron la mayor concentración de este parámetro. El sitio 4 se caracterizó por la tener la mayor abundancia de musgos y helechos; mientras que el sitio 6 tenía una corriente agua (o riachuelo) rodeada de musgos. Por otro lado, del sitio 2 se

esperaba cuantificar un mayor porcentaje de MO, porque presentaba una comunidad vegetal con herbáceas y arboles. En el sitio 3, como se ha mencionado, presentaba una comunidad de arboles del genero *Cupressus*; sin embargo, mostró concentraciones bajas de MO.

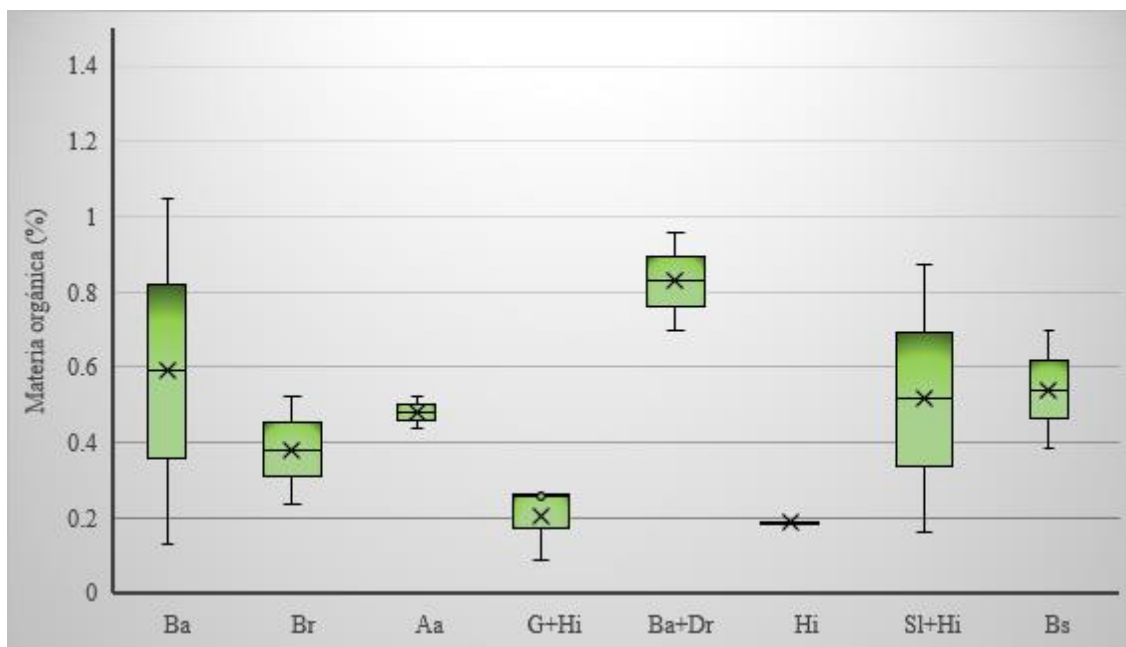


Figura 13. Porcentaje de materia orgánica (%MO) en el sustrato agrupado por grupo taxonómico de los musgos: *Ba*= *Bryum argenteum*; *Aa*= *Anoetangium aestivum*; *Br*= *Bryaceae*; *G+Hi* *Gymnostomum* + *Hyophila involuta*; *Ba+Dr*= *Bryum argenteum* + *Didimodon rigidulus*; *Hi*= *Hyophila involuta*; *Sl+Hi*=*Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; *Bs*= *Brachymerium systylium*.

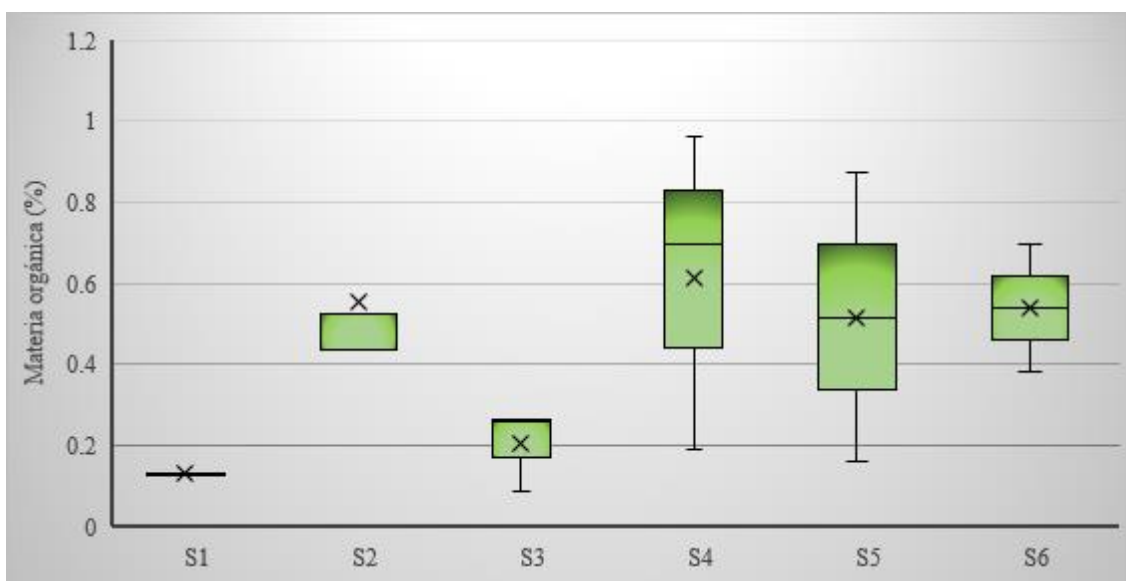


Figura 14. Porcentaje de materia orgánica (%MO) del sustrato por sitio de muestreo.

Determinación de sulfatos (SO_4^{2-})

El azufre es el 13° elemento más abundante de la corteza terrestre y su transformación depende de la actividad microbiana, siendo los sulfatos la forma más común en suelos ácidos, siendo adsorbido en la fracción mineral y compuestos orgánicos (Colacelli, 2001). Debido a la variación de las concentraciones obtenidas de sulfatos (SO_4^{2-}), las muestras se separaron en dos grupos: el primero, representado por las muestras con los valores más bajos en concentración del parámetro (de 0.07 a 0.168 mg Kg⁻¹) (Figura 15).

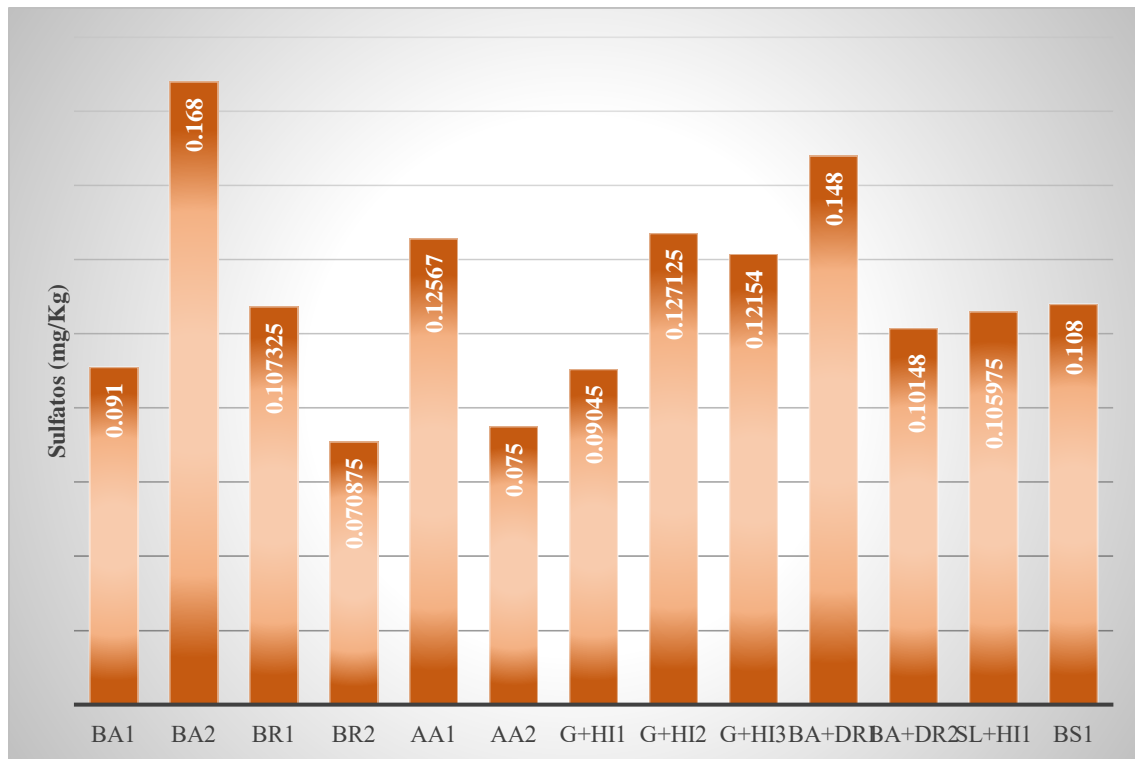


Figura 15. Concentraciones menores de sulfatos (SO_4^{2-}) en las muestras de sustrato asociados a los ejemplares de musgo colectados en el jal “La Concha”. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo: *Ba*= *Bryum argenteum*; *Aa*= *Anoetangium aestivum*; *Br*= *Bryaceae*; *G+Hi* *Gymnostomum* + *Hyophila involuta*; *Ba+Dr*= *Bryum argenteum* + *Didimodon rigidulus*; *Hi*= *Hyophila involuta*; *Sl+Hi*= *Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; *Bs*= *Brachymerium systylium*.

En el segundo grupo se encuentran las concentraciones mayores de sulfatos (SO_4^{2-}) que fueron cuantificadas en las muestras del sustrato asociado a los ejemplares de musgo (Figura 16); las cuales, van de los 104.61 a los 457.19 mg Kg^{-1} . Estas muestras fueron colectadas durante el último mes de muestreo, cuando las lluvias comenzaban su descenso; por lo que, el efecto de hidratación en el sustrato del jal propicio el incremento de la concentración de este anión por el efecto de la oxidación de los sulfuros presentes.

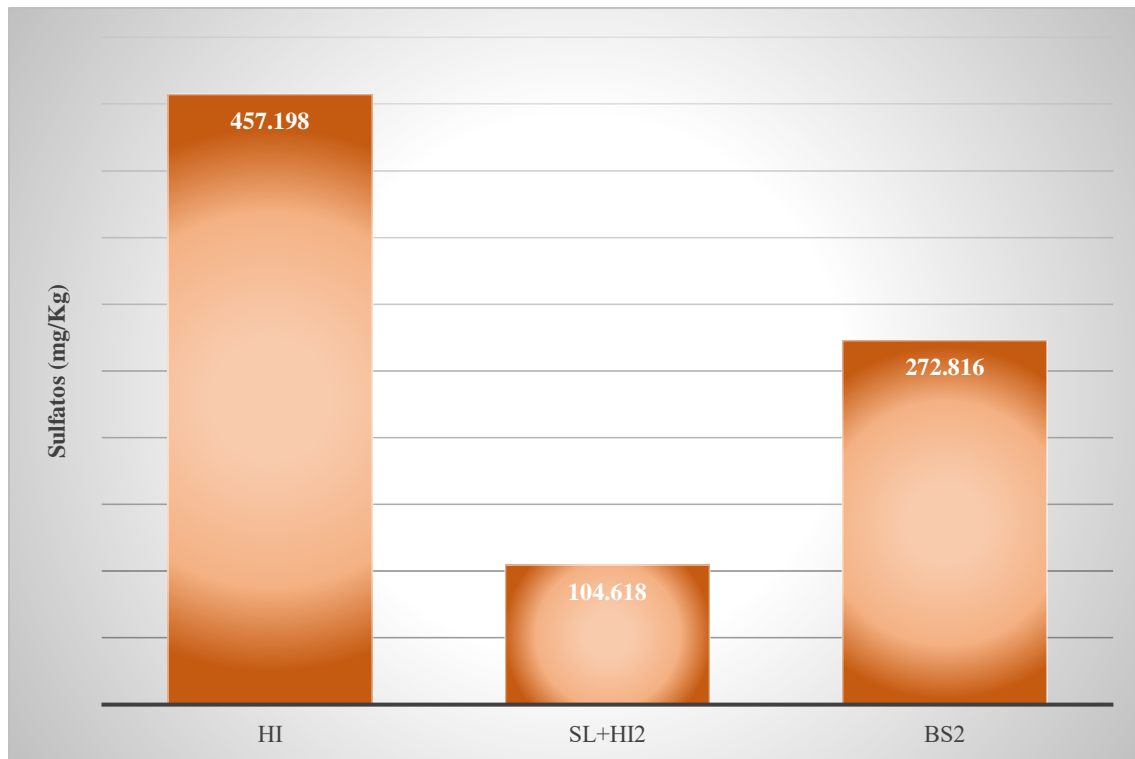


Figura 16 Concentraciones mayores de sulfatos (SO_4^{2-}) en las muestras de sustrato asociados a los ejemplares de musgo colectados en el jal “La Concha”. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo: *Ba*= *Bryum argenteum*; *Aa*= *Anoetangium aestivum*; *Br*= *Bryaceae*; *G+Hi* *Gymnostomum* + *Hyophila involuta*; *Ba+Dr*= *Bryum argenteum* + *Didimodon rigidulus*; *Hi*= *Hyophila involuta*; *Sl+Hi*=*Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; *Bs*= *Brachymenium systylium*.

Al agrupar las muestras de sustrato por grupo taxonómico (Figura 17), los sustratos asociados a *Bryum argenteum* mostraron las concentraciones mayores de sulfatos. Mientras que el sustrato asociado a los ejemplares del grupo *Bryaceae* fueron los que presentaron las menores concentraciones.

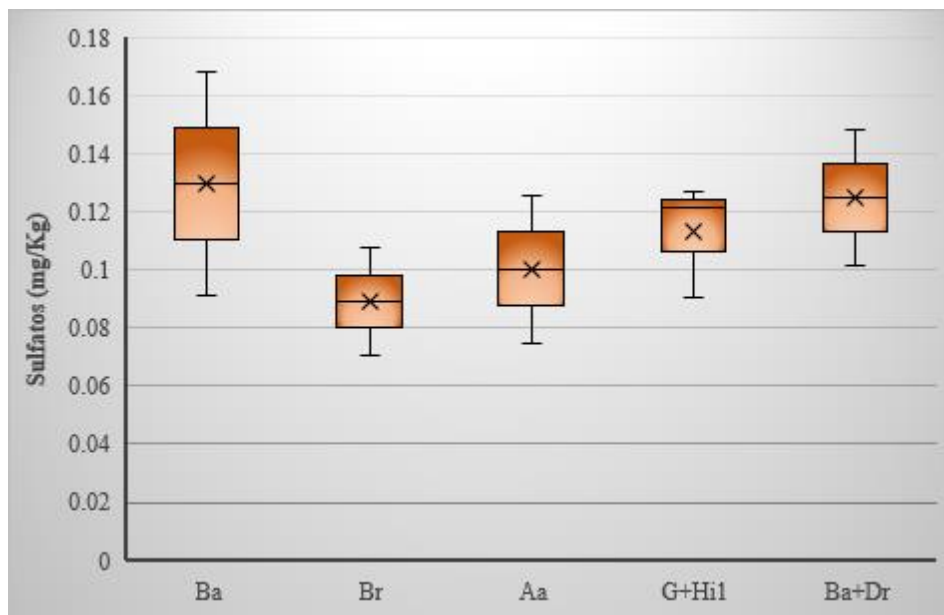


Figura 17 Concentración de sulfato en el sustrato agrupado por grupo taxonómico de los musgo: *Ba*= *Bryum argenteum*; *Aa*= *Anoetangium aestivum*; *Br*= *Bryaceae*; *G+Hi* *Gymnostomum* + *Hyophila involuta*; *Ba+Dr*= *Bryum argenteum* + *Didimodon rigidulus*; *Hi*= *Hyophila involuta*; *Sl+Hi*=*Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; *Bs*= *Brachymerium systylium*.

La concentración de sulfatos del grupo taxonómico *Hyophila involuta* mostraron la mayor concentración de este anión ($457.198 \text{ mg Kg}^{-1}$); es importante mencionar que solo fue colectado un ejemplar de esta especie. Mientras que el grupo de *Brachymerium systylium* fue el segundo con mayor concentración (0.108 a $272.816 \text{ mg Kg}^{-1}$) (Figura 18).

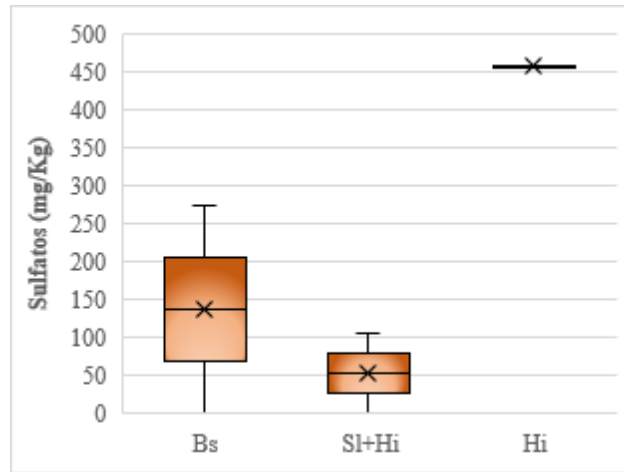


Figura 18. Concentración de sulfato en el sustrato agrupado por grupo taxonomico de los musgos.: *Hi*= *Hyophila involuta*; *Sl+Hi*=*Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; *Bs*= *Brachymenium systylium*.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de un sustrato está determinada por potencial para intercambiar iones y determina el grado de movimiento de nutrientes y contaminantes del suelo (Navarro-Aviño *et al.*, 2007). Contaminantes con la capacidad de intercambiarse en presencia de iones (metales pesados) o como aquellos que pueden modificar la estructura del sustrato (radicales orgánicos), son capaces de cambiar las propiedades naturales del sustrato (Millan *et al.*, 2010). En general, la CIC cuantificada en casi todas las muestras de sustrato fue baja (13.775meq); excepto en la muestra de sustrato donde se desarrollan *H. involuta* (Hi) y *S. lingulata* + *H. involuta* (Sl+Hi2) con un valor de CIC de 60.8 y 41 meq, respectivamente (Figura 19). El sustrato asociado a *H. involuta* fue el que tuvo un óptimo valor de CIC porque es el más cercano a valores de suelos naturales, con composición adecuada para el crecimiento de vegetación.

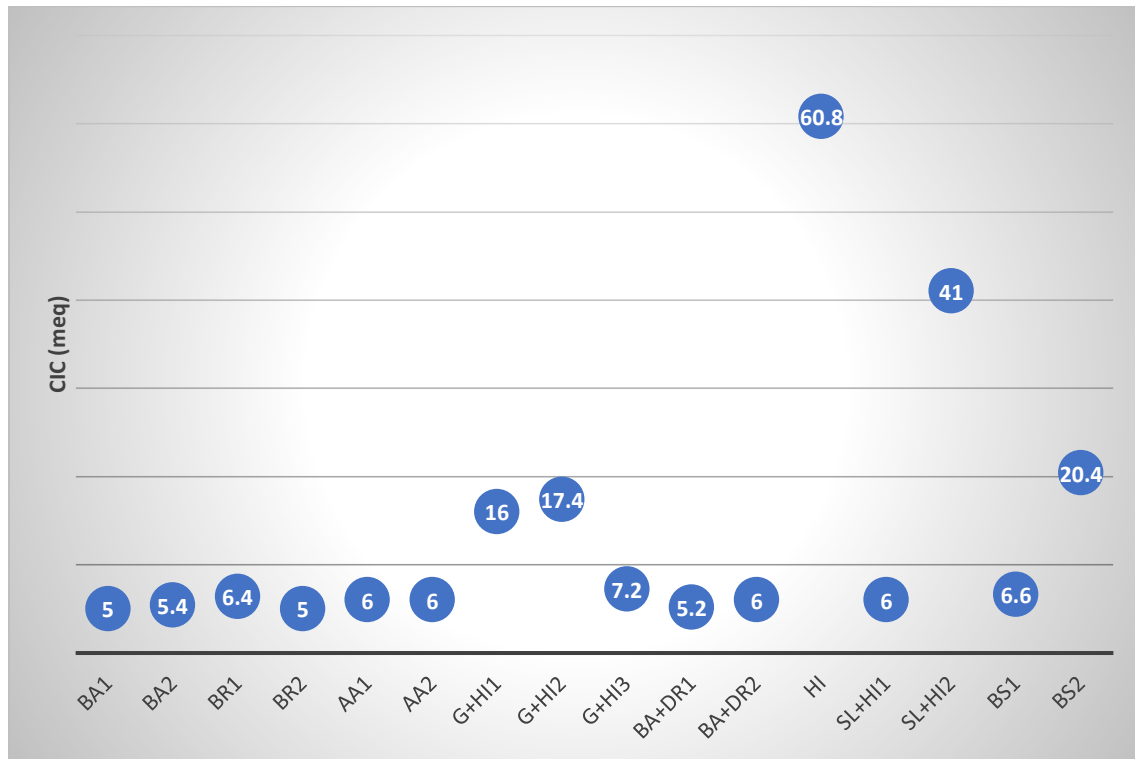


Figura 19. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) en las muestras de sustrato asociados a los ejemplares de musgo colectados en el jal “La Concha”. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo: *Ba*= *Bryum argenteum*; *Aa*= *Anoetangium aestivum*; *Br*= *Bryaceae*; *G+Hi* *Gymnostomum* + *Hyophila involuta*; *Ba+Dr*= *Bryum argenteum* + *Didimodon rigidulus*; *Hi*= *Hyophila involuta*; *Sl+Hi*=*Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; *Bs*= *Brachymenium systylium*.

Composición química de la biomasa de los musgos colectados en el jal “La Concha”

pH de la biomasa de musgos

El pH de la biomasa se cuantifico en los 16 ejemplares de musgos que fueron colectados en jal minero “La Concha” (Figura 20). El pH promedio de la biomasa de los musgos fue de 7.7, el cual, describe una tendencia hacia una condición de neutralidad. El pH máximo fue de 9.29 en la muestra uno del sitio 2, correspondiente al ejemplar Br1 de Bryaceae. El pH mínimo fue de 4.26 y se cuantifico en el ejemplar Bs2 de *Brachymenium systylium*. Comparando el pH del sustrato asociado a su rizoide con el pH de la biomasa de los musgos, no se observó una variación significativa (entre 0.01 a 0.05 unidades).

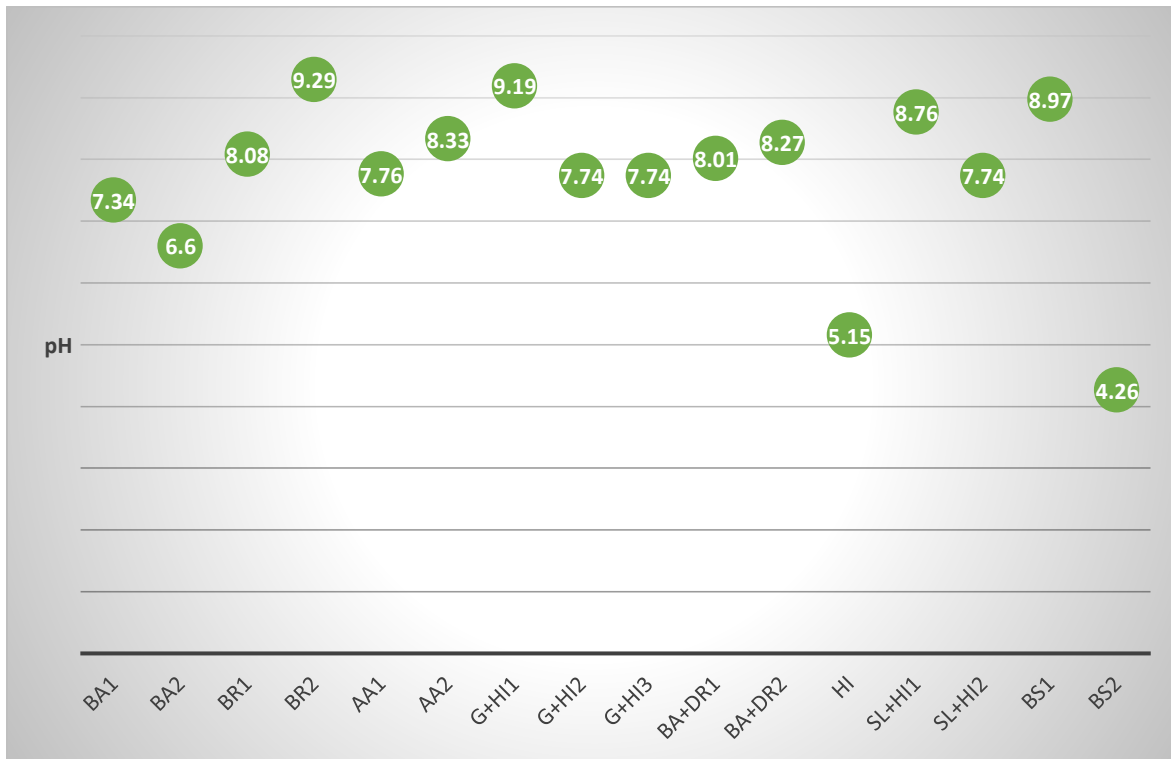


Figura 20. Valores de pH cuantificados en la biomasa de los musgos colectados en el jal “La Concha”. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo: *Ba*= *Bryum argenteum*; *Aa*= *Anoetangium aestivum*; *Br*= *Bryaceae*; *G+Hi* *Gymnostomum* + *Hyophila involuta*; *Ba+Dr*= *Bryum argenteum* + *Didimodon rigidulus*; *Hi*= *Hyophila involuta*; *Sl+Hi*= *Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; *Bs*= *Brachymenium systylium*.

Concentración de fósforo total en tejido vegetal de los musgos

El fósforo es uno de los principales elementos necesarios para la nutrición vegetal y es el componente principal de varias estructuras celulares (Fernández, 2007). En el tejido vegetal de los musgos, la mayor concentración de fosforo total (Pt) fue de 0.8 mg Kg⁻¹ en el ejemplar Br1 de *Bryaceae* y el valor mínimo se cuantificó en el ejemplar Aa2 de *Anoetangium aestivum* con una concentración de 0.014 mgKg⁻¹ Pt (Figura 21).

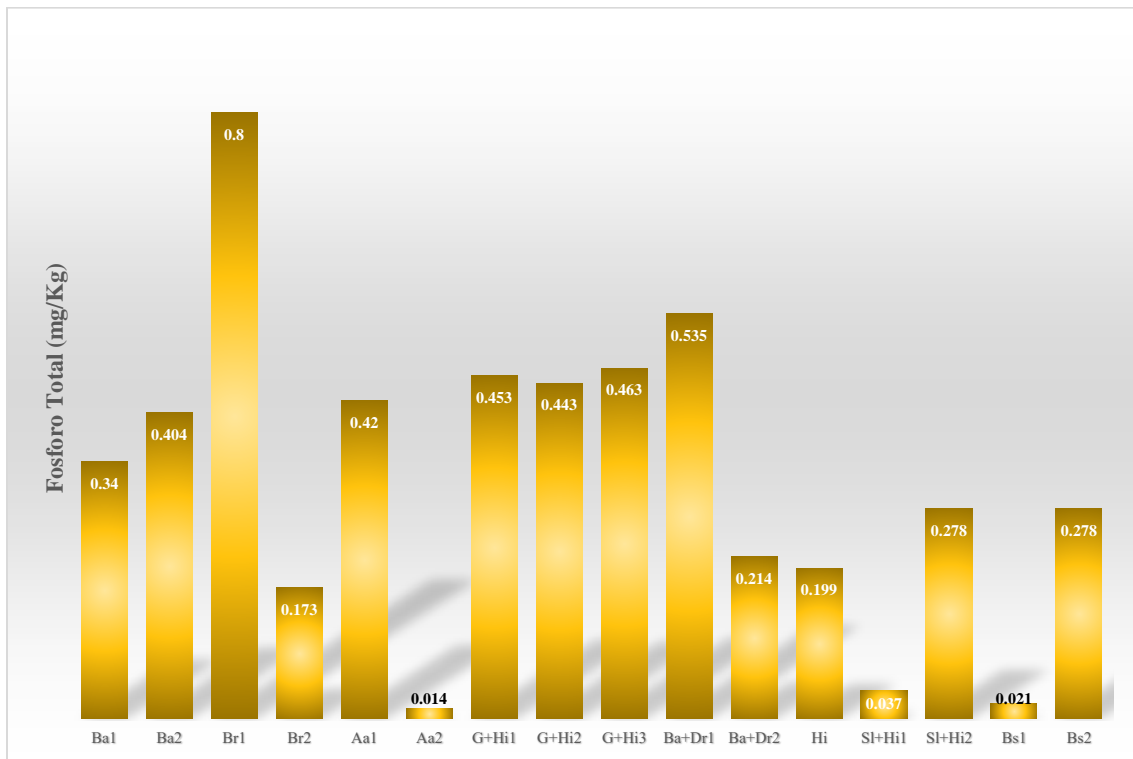


Figura 21. Concentración de fósforo total en tejido vegetal de los musgos colectados en el jal “La Concha”. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo: *Ba*= *Bryum argenteum*; *Aa*= *Anoetangium aestivum*; *Br*= *Bryaceae*; *G+Hi* *Gymnostomum* + *Hyophila involuta*; *Ba+Dr*= *Bryum argenteum* + *Didimodon rigidulus*; *Hi*= *Hyophila involuta*; *Sl+Hi*=*Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; *Bs*= *Brachymerium systylium*.

Carbono orgánico en tejido vegetal de los musgos

El porcentaje de carbono orgánico (%CO) en los organismos varía con las condiciones en las que estos se desarrollan; en lugares sin perturbación y con suficiente humedad %CO va de 20 a 45% (Gamarra *et al.*, 2018). En los musgos del jal “La Concha”, el máximo %CO fue de 11%; por lo que, la fracción inorgánica y el fosforo total se encuentran en mayor proporción (Figura 22). La asociación entre *Scopelophila lingulata* y *Hyophila involuta* (SI+Hi2) fue la que tuvo el mayor %CO. Mientras que *Hyophila involuta* (Hi) fue el musgo con el menor %CO.

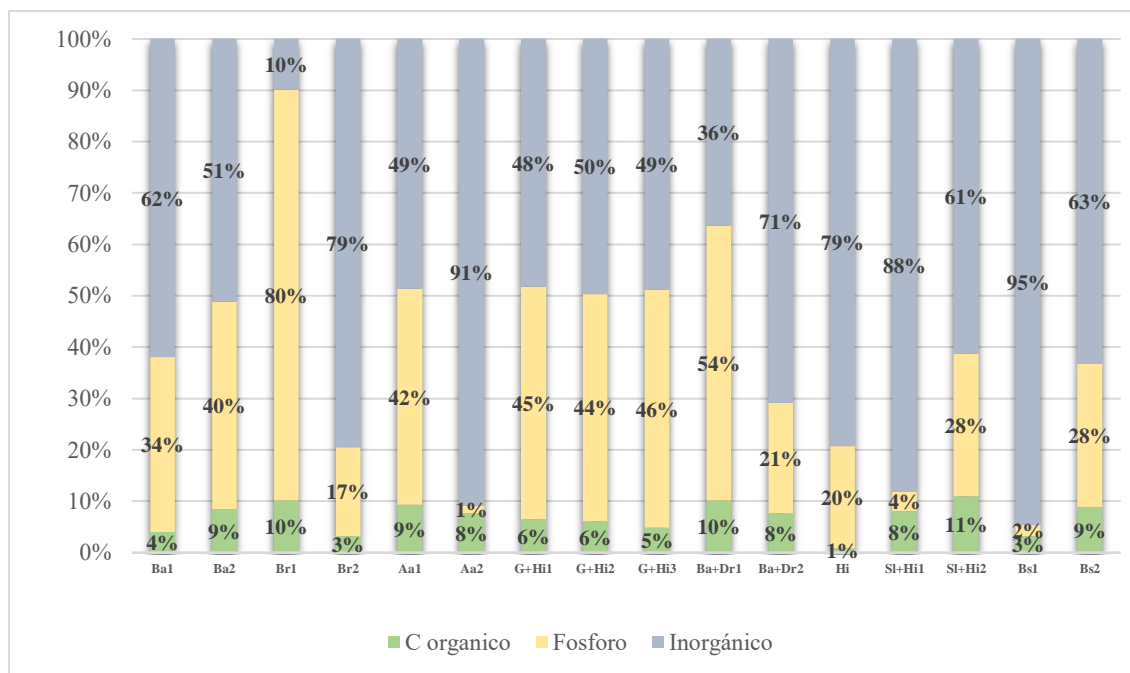


Figura 22. Contenido de carbono orgánico (%CO) y contenido de la fracción inorgánica en el tejido vegetal de los musgos identificados en el jal “La Concha”. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo: Ba= *Bryum argenteum*; Aa= *Anoetangium aestivum*; Br= *Bryaceae*; G+Hi *Gymnostomum* + *Hyophila involuta*; Ba+Dr= *Bryum argenteum* + *Didimodon rigidulus*; Hi= *Hyophila involuta*; SI+Hi= *Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; Bs= *Brachymerium systylium*.

Concentración de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) en el sustrato del jal “La Concha”

Los elementos potencialmente tóxicos (EPT) son componentes químicos que se consideran dañinos para la salud cuando alcanzan concentraciones altas en el medio ambiente o dentro de los organismos; un ejemplo de EPT son los metales pesados (MP) (Ali *et al.*, 2019; Rehman *et al.*, 2020). Los MP son componentes naturales de la corteza terrestre (en forma de minerales, sales y otros compuestos) que se encuentran biodisponibles de acuerdo con las características del sustrato (Tchounwou *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2016). Debido a la amplia variabilidad de concentración en la que los MP se pueden encontrar, se emplearon dos fuentes con las cuales se pueden comparar los datos (Tabla 2). La primera es propuesta por Bowie & Thornton (1985), donde explica las concentraciones encontradas en estabilidad ambiental y cuáles son las concentraciones denominadas como peligrosas porque causan daños a los organismos presentes en el sustrato. El segundo criterio, establecido en la norma mexicana NMX-021-RECNAT, se contemplan las concentraciones normales y peligrosas para algunos de los EPT que afectan la nutrición vegetal.

Tabla 2 Resumen de concentraciones normales, peligrosas y anómalas propuestas por Bowie & Thornton (1985) y NOM-021-RECNAT-2000.

Elemento	Rango normal (Bowie & Thornton, 1985)	Rango normal (NOM-021-RECNAT)	Concentraciones anómalas (Bowie & Thornton, 1985)	Concentraciones peligrosas (NOM-021-RECNAT)
Cd	< 1-2	0.35	Hasta 30	3-5
Cu	60	>0.2	Hasta 2000	----
Fe	----	>4.5	----	----
Pb	10-150	35	10000 o más	100-300
Zn	35-200	>1.0	10000 o más	----

Las concentraciones de MP en el sustrato del jal “La Cocha” se presenta en la figura 23 donde se observa que el elemento con mayor presencia en el sustrato analizado fue hierro (Fe), con concentraciones que van de 1017.57 a 99895.65 mg Kg⁻¹; valores por encima de los límites de la norma mexicana. Seguido de plomo (Pb) (524.45 a 2768.31 mg Kg⁻¹), cuyos valores de concentración sobrepasan ambos criterios utilizados por 100 órdenes de magnitud.

El cobre (Cu) tuvo una concentración de 40.0 mg Kg^{-1} , el cual, se encuentra debajo del rango anómalo o peligroso reportado Bowie & Thornton (1985): $216.01 \text{ mg Kg}^{-1}$. El cadmio (Cd) tuvo concentraciones que van de 0.51 a 163 mg Kg^{-1} y el zinc (Zn) tuvo concentraciones de 51.31 a $438.63 \text{ mg Kg}^{-1}$; los cuales, se encuentran dentro de los valores normales de ambas referencias utilizadas.

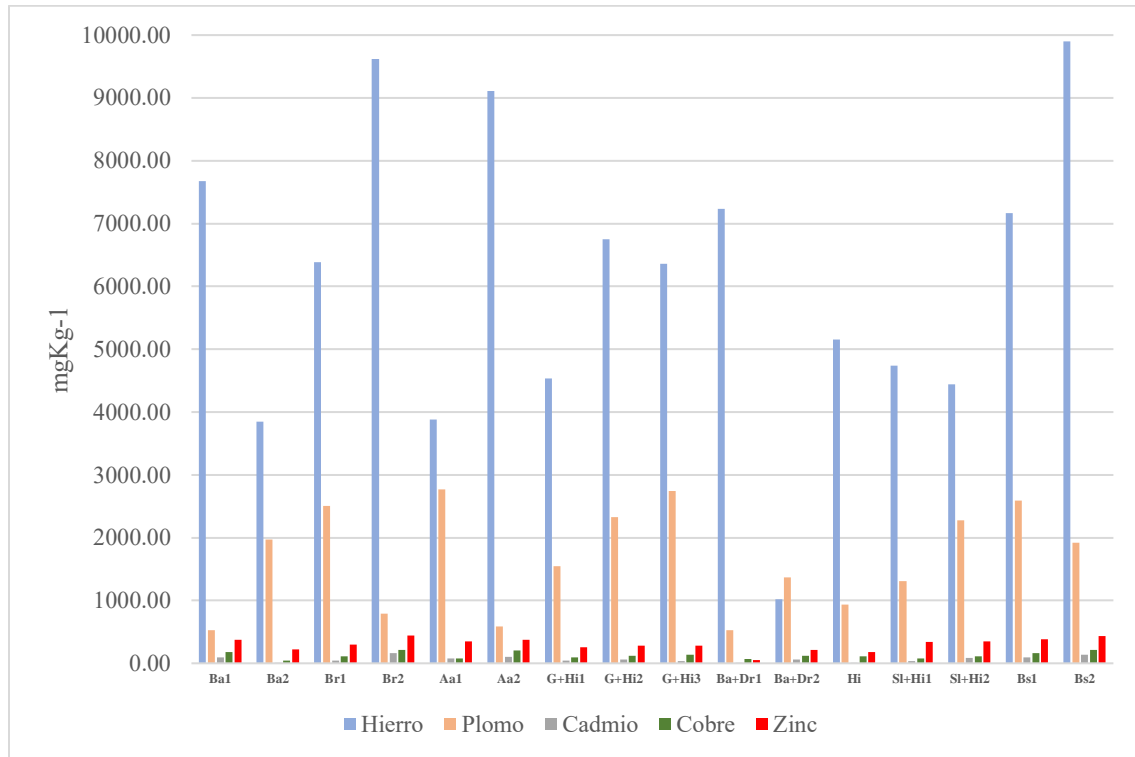


Figura 23. Concentración de los metales pesados en el sustrato asociado a los musgos del jal “La Concha”. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo: Ba= Bryum argenteum; Aa= Anoetangium aestivum; Br= Bryaceae; G+Hi Gymnostomum + Hyophila involuta; Ba+Dr= Bryum argenteum + Didimodon rigidulus; Hi= Hyophila involuta; Sl+Hi=Scopelophila lingulata + Hyophila involuta; Bs= Brachymerium systylium

Concentración de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) en la biomasa de los musgos colonizadores del jal “La Concha”

Los EPT analizados representan menos del 3.0% de la biomasa de los musgos (24), siendo los más abundantes Pb, Fe y Zn. En cuanto a concentraciones individuales de cada MP (Figura 25), el ejemplar de *H. involuta* fue el musgo con la menor acumulación de varios de estos elementos, solo mostró una concentración alta en Fe (5218 mg Kg⁻¹). En el caso del Pb, la mayoría de los ejemplares de los grupos taxonómicos identificados mostraron una alta concentración de este MP.

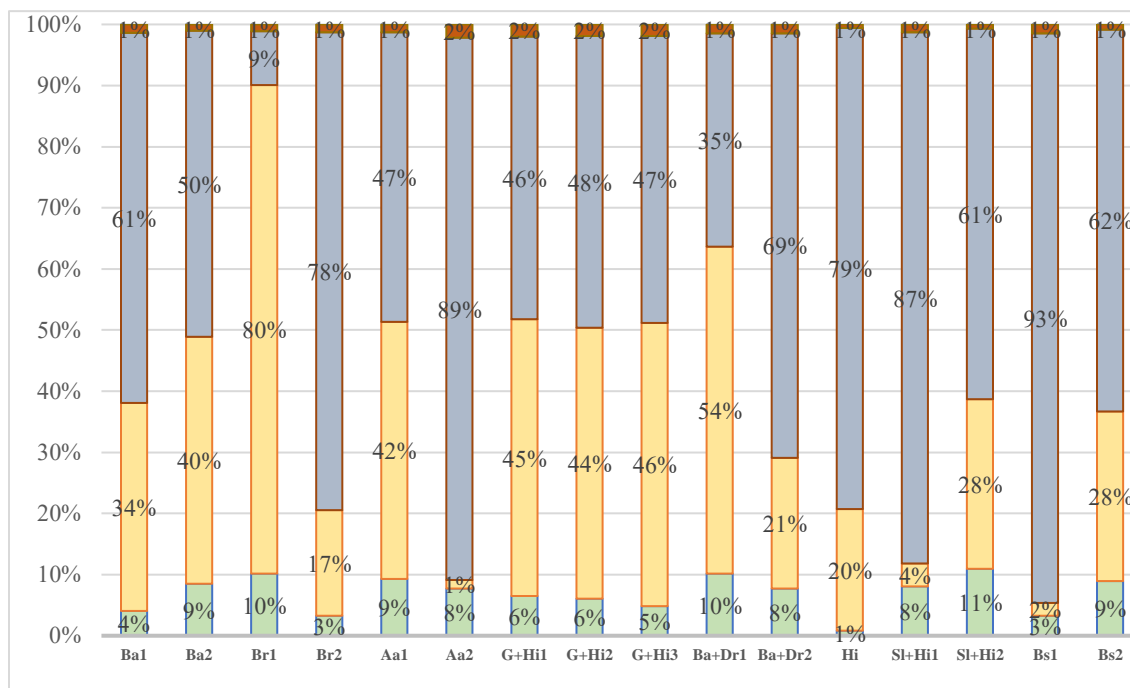


Figura 24. Contenido de metales pesados (color café) en biomasa de musgos en comparación con el contenido de carbono orgánico (verde), fósforo total (amarillo) y la fracción inorgánica restantes (gris). Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo: *Ba*= *Bryum argenteum*; *Aa*= *Anoetangium aestivum*; *Br*= *Bryaceae*; *G+Hi* *Gymnostomum* + *Hyophila involuta*; *Ba+Dr*= *Bryum argenteum* + *Didimodon rigidulus*; *Hi*= *Hyophila involuta*; *Sl+Hi*=*Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*; *Bs*= *Brachymerium systylium*

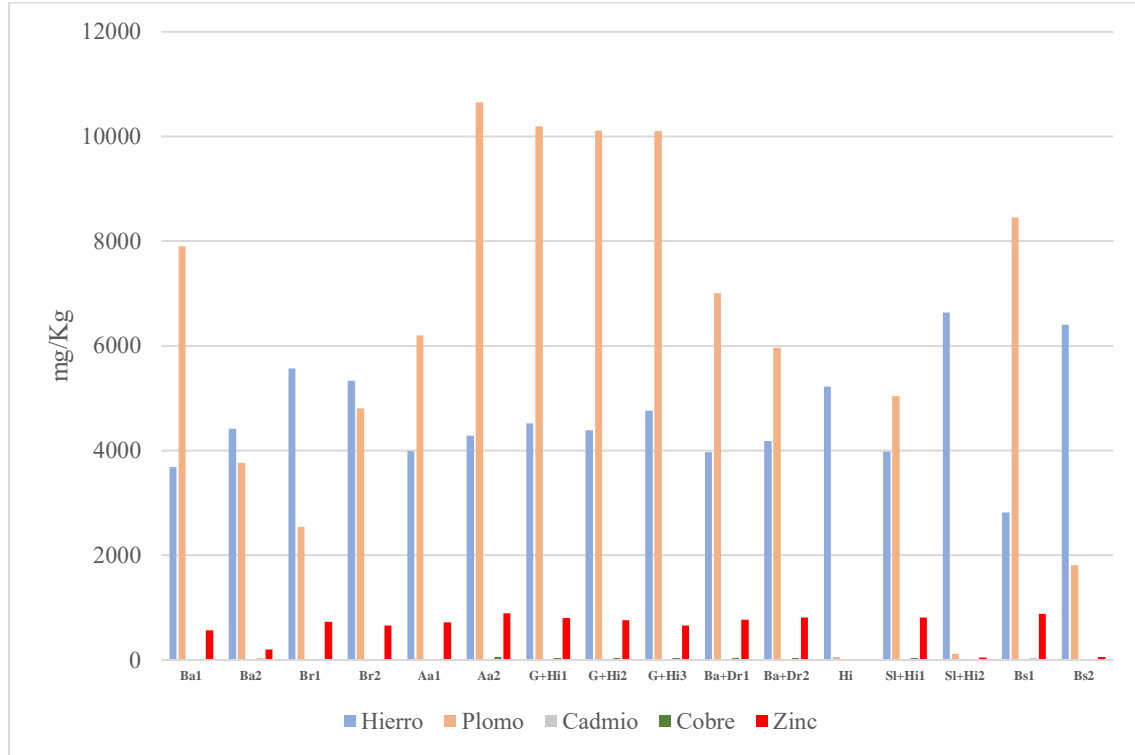


Figura 25 . Concentración de metales pesados en los musgos identificados en el jal “La Concha”. Las siglas corresponden a la determinación taxonómica de cada individuo: Ba= Bryum argenteum; Br= Bryaceae; Aa= Anoetangium aestivum; G+Hi Gymnostomum + Hyophila involuta; Ba+Dr= Bryum argenteum + Didimodon rigidulus; Hi= Hyophila involuta; Sl+Hi=Scopelophila lingulata + Hyophila involuta; Bs= Brachymerium systylium

El potencial de bioextracción (PB) es un índice donde se considera la concentración de los elementos encontrados en el sustrato y en el organismo, esto se utiliza para conocer el comportamiento de las plantas ante los contaminantes y se divide tres categorías, excluyentes (valores menores a 0.1), tolerantes (de 0.1 a 1.0) e hiperacumuladores (Mayores a 1.0) (Hazrat *et al.*, 2019). Los musgos colonizadores mostraron una capacidad diferencial en la bioacumulación de los MP considerados en el presente estudio (Anexos, Figura 1A y 2A). De acuerdo con esta categoría, los musgos analizados son catalogados como hiperacumuladores para Pb y Zn. En caso particular del Cd, únicamente cuatro organismos son catalogados como excluyentes, mientras que los 12 restantes son denominados tolerantes. Para Cu la mayoría

de los organismos son tolerantes; a excepción de cuatro que son excluyentes para este metal. Los musgos se catalogan como tolerantes en presencia de Fe de acuerdo con este índice (Figura 23).

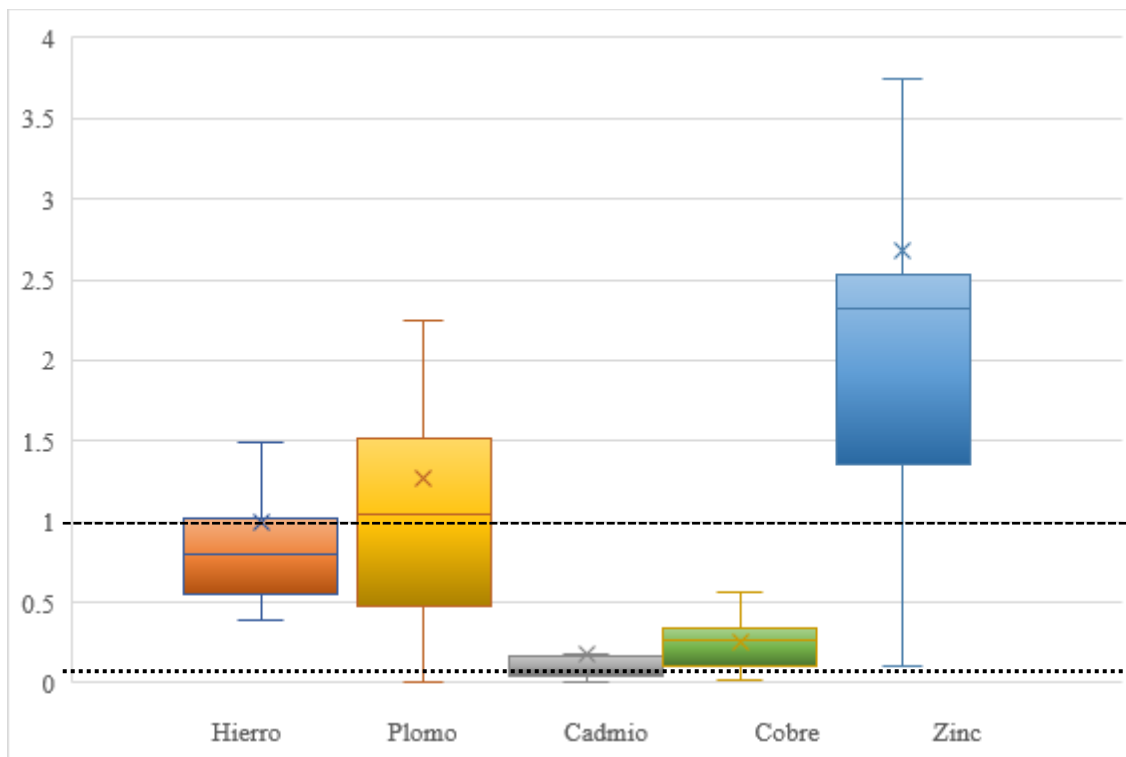


Figura 23. Potencial de bioextracción por cada metal pesado cuantificado en la biomasa de los musgos colonizadores del jal “La Concha”.

Analizando los valores de PB por cada especie de musgo identificada (Tabla 3), cada uno de los EPT analizados muestran que *Bryum argenteum* + *Didymodon rigidulus* var. *Icmadophilus* es catalogado como hiperacumulador de Zn. En el caso del Cu, los musgos analizados se catalogan como tolerantes, con excepción de *Hyophila involuta* que es excluyente para este elemento. Para el Cd, únicamente un organismo se reporta como hiperacumulador (*Bryum argenteum*); el resto se cataloga como excluyente o tolerante. Para *Hyophila involuta* se observó que es un musgo excluyente para Pb, Cd, Cu y Zn; mientras que es catalogado como hiperacumulador para Fe.

Tabla 3 Valores del potencial de Bioextracción de las especies; los valores a criterio de este índice son: exclusoras (E) si el valor es menor a 0.1; tolerantes (T) en el intervalo de 0.1 a 1.0 e Hiperacumuladoras (H) si el valor es mayor a 1.0.

		Valores de bioextracción por especie					
		Sitio	Hierro	Plomo	Cadmio	Cobre	Zinc
<i>Anoetangium aestivum</i>	S2	1.02 (H)	1.59 (H)	0.03 (E)	0.26 (T)	2.06 (H)	
	S2	0.47 (T)	1.16 (H)	0.05 (E)	0.27 (T)	2.39 (H)	
<i>Brachymerium systylium</i>	S6	0.39 (T)	1.17 (H)	0.05 (E)	0.16 (T)	2.29 (H)	
	S6	0.64 (T)	0.18 (T)	0.40 (T)	0.01 (E)	0.13 (T)	
<i>Bryaceae</i>	S2	0.87 (T)	0.39 (T)	0.06 (T)	0.17 (T)	2.47 (H)	
	S2	0.55 (T)	0.49 (T)	0.01 (E)	0.09 (T)	1.50 (H)	
<i>Bryum argenteum</i>	S1	0.48 (T)	1.02 (H)	0.01 (E)	0.11 (T)	1.53 (H)	
	S4	1.14 (H)	0.97 (T)	1 (H)	0.56 (T)	0.91 (T)	
<i>Bryum argenteum + Didymodon rigidulus</i> var. <i>Icmadophilus</i>	S4	0.54 (T)	0.96 (T)	0.55 (T)	0.48 (T)	15.10* (H)	
	S4	4.11* (H)	5.86* (H)	0.10 (T)	0.30 (T)	3.74 (H)	
<i>Gymnostomum + Hyophila involuta</i>	S3	0.99 (T)	2.24 (H)	0.10 (T)	0.42 (T)	3.09 (H)	
	S3	0.64 (T)	1.49 (H)	0.09 (T)	0.32 (T)	2.71 (T)	
	S3	0.74 (T)	1.58 (H)	0.18 (T)	0.28 (T)	2.33 (H)	
<i>Hyophila involuta</i>	S4	1.01 (H)	0.01 (E)	0.07 (T)	0.01 (E)	0.10 (T)	
<i>Scopelophila lingulata + Hyophila involuta</i>	S5	0.84 (T)	1.06 (H)	0.11 (T)	0.40 (T)	2.40 (H)	
	S5	1.49 (H)	0.02 (T)	0.002 (E)	0.03 (T)	0.13 (T)	

Análisis estadístico

Dado el comportamiento no normal de los datos obtenidos durante el análisis químico, del sustrato asociado y la biomasa de los musgos, se realizó un análisis de correlación con las muestras en tres casos diferentes, debido al origen de los datos y la información que se esperaba obtener. En el primer caso (Tabla 4) se muestran las correlaciones que existen tomando en cuenta todos los datos obtenidos de los análisis realizados en el tejido o biomasa de los musgos, mostrando correlaciones significativas entre las siguientes variables: el pH se relaciona con Pb, Cu y Zn; mientras que estos tres MP se relacionan entre sí y con el Fe (con este último de manera negativa). Los metales Pb, Cu y Zn presentan las correlaciones con mayor significancia ($p < 0.01$), al igual que el porcentaje de materia orgánica (%MO) y de carbono orgánico (%CO), esta relación es debido a que estos son el resultado se derivan uno del otro.

Tabla 4. Correlaciones existentes entre los análisis del tejido o biomasa vegetal de los musgos.

	pH	%C. Orgánico	%MO	Fósforo	Hierro	Plomo	Cadmio	Cobre	Zinc
pH	1								
%Carbono Orgánico	0.057	1							
%Materia Orgánica	0.057	1.000**	1						
Fósforo	-0.083	0.385	0.385	1					
Hierro	-0.436	0.283	0.283	0.233	1				
Plomo	0.507*	-0.179	-0.179	-0.044	-0.664**	1			
Cadmio	-0.278	0.288	0.288	-0.110	0.291	0.085	1		
Cobre	0.599*	0.031	0.031	-0.104	-0.571*	0.876**	0.082	1	
Zinc	0.782**	0.000	0.000	-0.016	-0.688**	0.775**	-0.036	0.814**	1

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

**.. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Estas relaciones encontradas se emplearon en el análisis de componentes principales (ACP), en el cual se realizó el ajuste pertinente para la obtención de dos componentes principales, que explica el 68.37% del comportamiento de los datos, considerado como el suficiente. En la Figura 26 se muestra de qué manera los componentes principales explican cada uno de análisis realizados.

Tabla 5. Matriz de coeficiente de puntuación de componente.

	Componente	
	1	2
pH	0.216	0.044
%Carbono Orgánico	0.043	0.399
%Materia Orgánica	0.043	0.399
Fósforo	0.003	0.212
Hierro	-0.188	0.126
Plomo	0.237	-0.021
Cadmio	0.000	0.158
Cobre	0.254	0.055
Zinc	0.262	0.043

Puntuaciones de componente.

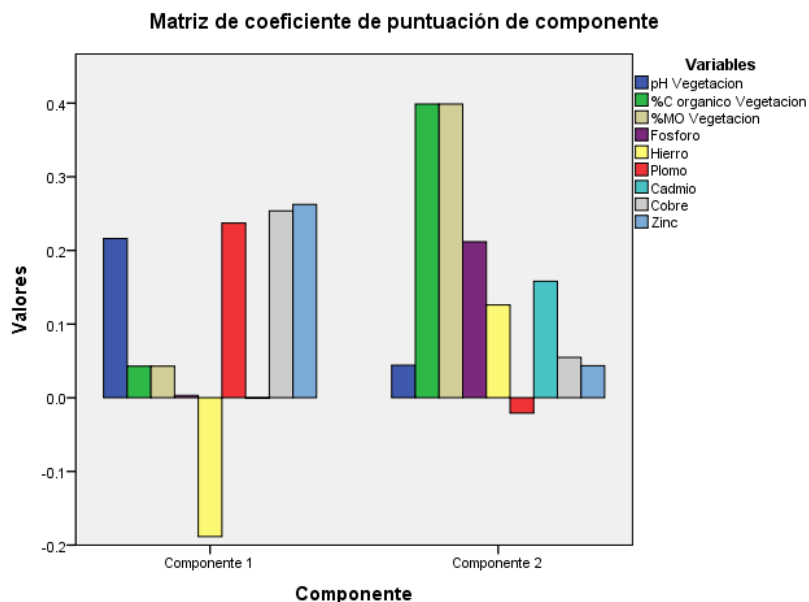


Figura 24. Matriz de coeficiente de puntuación de componente.

En la Figura 28, se explica la relación entre el Cd y el fósforo, y el CO y la MO. Mientras el Cu, Zn y Pb se relacionan con el pH de forma estrecha. El Fe, en apariencia, no se encuentra relacionado con ninguno de los parámetros.

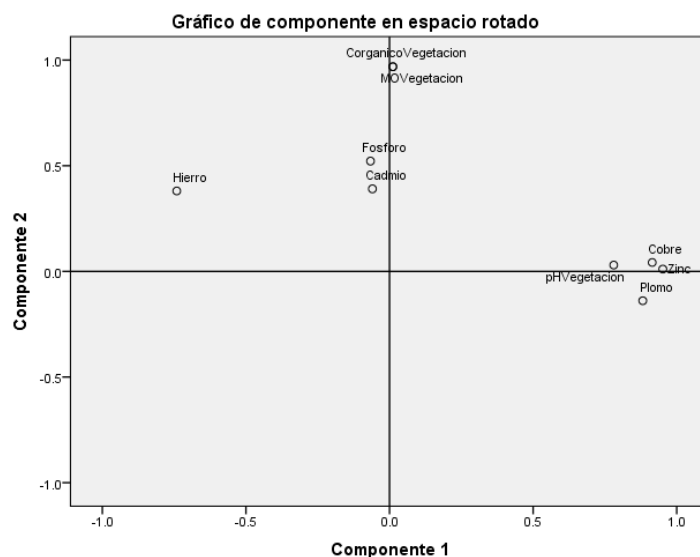


Figura 25. Distribución de los parámetros determinados en el tejido o biomasa vegetal de los musgos en los componentes principales.

En el segundo caso (Tabla6) se analizaron los componentes químicos del sustrato (sulfatos, materia orgánica, pH, CIC) y la concentración de elementos potencialmente tóxicos (Hierro, Cadmio, Cobre, Plomo y Zinc). Obteniendo correlaciones significativas principalmente, pH entre Sulfatos, CIC, Plomo, Cobre y Zinc; Sulfatos entre CIC, Hierro, Plomo, cobre y Zinc; y por último entre Materia Orgánica y fósforo. Estas correlaciones explican la manera en la que tanto los nutrientes como elementos tóxicos se movilizan entre el sustrato y el organismo vegetal.

Tabla 6. Correlaciones entre las concentraciones de EPT en el tejido vegetal y los análisis del sustrato.

	pH	sulfatos	Fosfatos	%MO	CIC	Hierro	Plomo	Cadmio	Cobre	Zinc
pH	1									
Sulfatos	-0.791**	1								
Fosfatos	0.143	-0.101	1							
%MO	0.149	-0.304	0.666**	1						
CIC	-0.535*	0.858**	-0.146	-0.464	1					
Hierro	-0.458	0.498*	-0.554*	-0.419	0.529*	1				
Plomo	0.544*	-0.638**	0.048	-0.025	-0.582*	-0.664**	1			
Cadmio	-0.279	0.125	-0.085	0.000	-0.091	0.291	0.085	1		
Cobre	0.613*	-0.663**	0.077	0.216	-0.594*	-0.571*	0.876**	0.082	1	
Zinc	0.802**	-0.756**	0.180	0.209	-0.720**	-0.688**	0.775**	-0.036	0.814**	1

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

Estas relaciones se utilizaron para hacer un ACP, en la cual se logró obtener un panorama general de las relaciones que existen entre los nutrimentos y los MP o EPT en tejido o biomasa vegetal. Se obtuvieron dos componentes principales que explican el 69.41% del comportamiento de los datos (Figura 28). Se definieron tres relaciones significativas (Figura 29): la primera, muestra que existe una relación cercana entre la concentración de fosfatos y la MO en el sustrato; la segunda, similar al ACP1, describe la relación entre el pH y los metales Cu, Zn y Pb y, la tercera, explica la relación que existe entre el CIC, los sulfatos y el Fe. El Cd fue el único MP que tuvo un comportamiento atípico porque su ubicación muestra una tendencia de relación con el pH de forma positiva, y negativa con CIC y los sulfatos.

Tabla 7. Matriz de coeficiente de puntuación de componente

	Componente	
	1	2
Hierro	-0.080	-0.235
Plomo	0.213	-0.141
Cadmio	0.022	-0.125
Cobre	0.200	-0.085
Zinc	0.197	-0.029
pH	0.170	-0.030
Sulfatos	-0.182	0.015
Fosfatos	-0.097	0.483
%MO	-0.068	0.448
CIC	-0.150	-0.052
Método de extracción: análisis de componentes principales.		

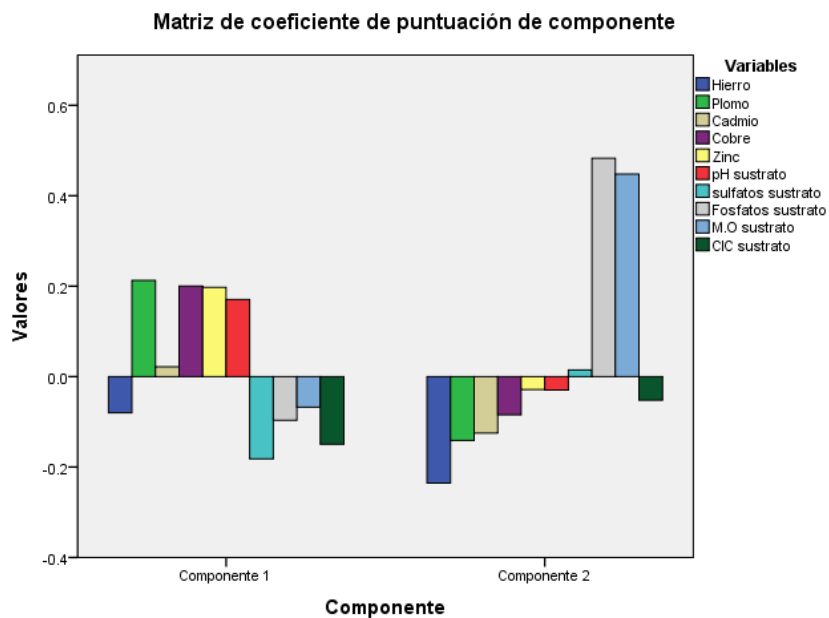


Figura 26. Matriz de puntuación de componente en las relaciones existentes entre los EPT presentes en el tejido vegetal y los nutrientes en el sustrato.

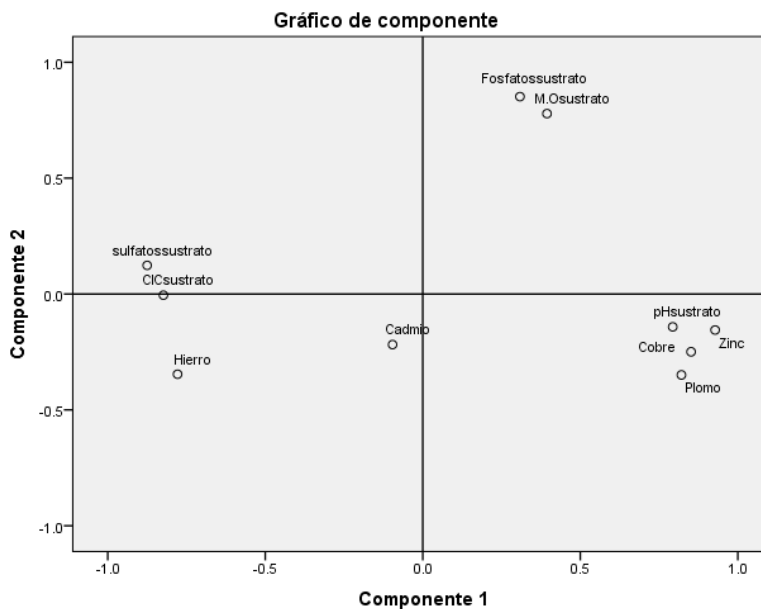


Figura 27. Distribución de los metales pesados en el tejido o biomasa vegetal con los parámetros del sustrato en los componentes principales.

Este análisis mostró que el Cd se encuentra relacionando con los nutrientes en tejidos vegetal; mientras que el Fe en tejido vegetal depende de la acción de los sulfatos y la CIC del sustrato. El Cu, Zn y Pb son elementos que se movilizan dependiendo del pH. Estas relaciones pueden explicar la manera en que los musgos son capaces de interactuar con los EPT.

En el tercer ACP, se describió la relación entre las especies de musgos y su impacto en las propiedades del sitio de estudio, como el pH y la concentración de MP. Con lo que se observó que todas las especies de musgo tienen una relación significativa (Tabla 8). En este APC se observó que las especies de musgos explican el 96.2% del comportamiento de los datos (Tabla 9; Figura 21).

Tabla 8. Correlaciones existentes entre las especies de musgos respecto a los análisis realizados

	Ba1	Ba2	Br1	Br2	Aa1	Aa2	G+Hi1	G+Hi2	G+Hi3	Ba+Dr1	Ba+Dr2	Hi	Sl+Hi1	Sl+Hi2	Bs1	Bs2
Ba1	1															
Ba2	0.896**	1														
Br1	0.826**	0.948**	1													
Br2	0.934**	0.908**	0.944**	1												
Aa1	0.919**	0.957**	0.838**	0.834**	1											
Aa2	0.997**	0.880**	0.791**	0.906**	0.922**	1										
G+Hi1	0.932**	0.880**	0.711**	0.778**	0.963**	0.949**	1									
G+Hi2	0.973**	0.912**	0.789**	0.858**	0.975**	0.981**	0.983**	1								
G+Hi3	0.961**	0.923**	0.793**	0.847**	0.985**	0.969**	0.986**	0.998**	1							
Ba+Dr1	0.997**	0.915**	0.857**	0.950**	0.922**	0.991**	0.925**	0.967**	0.956**	1						
Ba+Dr2	0.787**	0.854**	0.655**	0.638**	0.924**	0.808**	0.944**	0.886**	0.905**	0.791**	1					
Hi	0.650**	0.815**	0.937**	0.862**	0.621**	0.599**	0.480*	0.565**	0.568**	0.694**	0.446*	1				
Sl+Hi1	0.969**	0.973**	0.907**	0.937**	0.969**	0.961**	0.937**	0.968**	0.969**	0.979**	0.862**	0.743**	1			
Sl+Hi2	0.574**	0.831**	0.922**	0.776**	0.645**	0.526**	0.476*	0.539**	0.556**	0.622**	0.516**	0.966**	0.718**	1		
Bs1	0.976**	0.889**	0.800**	0.881**	0.951**	0.980**	0.944**	0.987**	0.980**	0.968**	0.805**	0.571**	0.954**	0.524**	1	
Bs2	0.789**	0.861**	0.968**	0.953**	0.716**	0.744**	0.595**	0.700**	0.694**	0.819**	0.485*	0.961**	0.833**	0.895**	0.732**	1

** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 9. Matriz de coeficiente de puntuación de componente

	Componente	
	1	2
G+Hi1	0.964	0.243
G+Hi2	0.936	0.350
G+Hi3	0.933	0.353
Bs1	0.905	0.376
Aa2	0.900	0.390
Aa1	0.884	0.423
Ba+Dr2	0.881	0.217
Ba1	0.867	0.453
Ba+Dr1	0.844	0.502
Sl+Hi1	0.829	0.557
Ba2	0.732	0.656
Hi	0.247	0.965
Sl+Hi2	0.233	0.936
Bs2	0.406	0.899
Br1	0.527	0.844
Br2	0.640	0.733

Método de extracción: análisis de componentes principales.

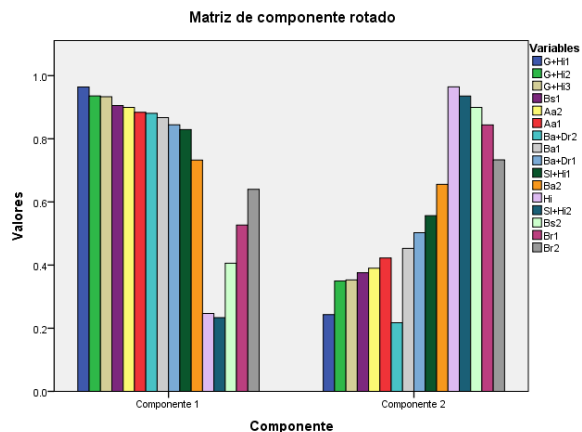


Figura 28. Puntuación del ACP.

La Figura 29 muestra cómo se relacionan las especies de musgo, en particular la relación que existe con el pH (CP2), porque se observa una tendencia ascendente (ácido-alcalino) partiendo del cruce entre los componentes hacia el extremo derecho. Mientras que el CP1 se observó cómo se relacionan los MP (o EPT) de manera ascendente partiendo del extremo superior del componente, siendo mayor en el cruce de los componentes.

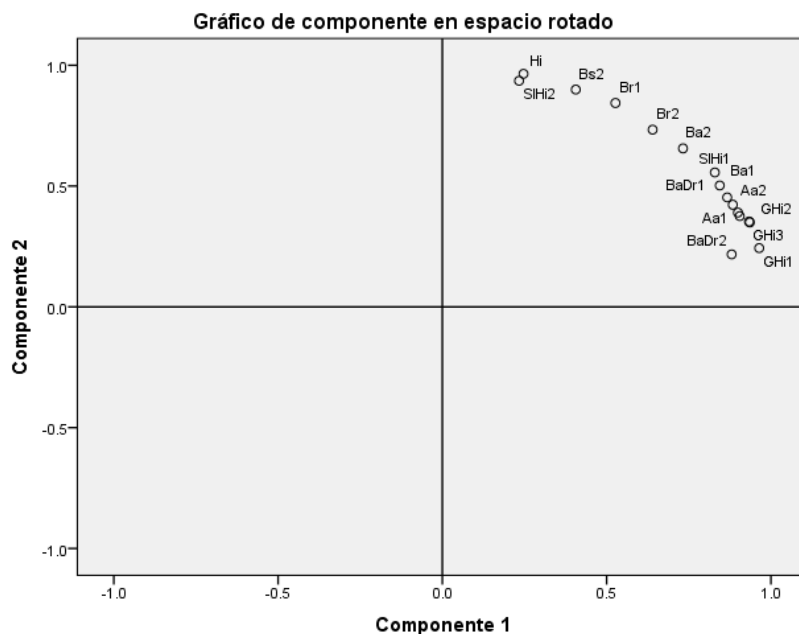


Figura 29 Dispersión de las muestras en los componentes principales; donde se muestra la relación existente entre las especies y los análisis realizados.

Discusión

Los musgos son plantas no vasculares de amplia distribución mundial, que usualmente viven en lugares húmedos o cerca del agua (Nikishiyama *et al.*, 2004; Shaw & Renzaglia *et al.*, 2004). Se encuentran entre los primeros organismos que colonizan rocas, pues al crecer sobre ellas modifican su superficie, formando un sustrato en el que se pueden arraigar otras plantas (Nikishiyama & Kato, 1999). Debido a su arreglo tisular y la falta de cutícula, los musgos tienen la capacidad de absorber contaminantes; principalmente, aquellos que están solubles en agua, en concentraciones altas en sustratos o que están disponibles en la atmósfera (Oishi & Hiura, 2017; Radziemska *et al.*, 2019; Yushin *et al.*, 2020). Por esta razón, los musgos se consideran como bioindicadores de contaminación (Delgadillo, 1990; Hallingbäck *et al.*, 2000; Glime, 2006).

En México existen 984 especies y variedades de musgos (Delgadillo, 2014). En el estado de Guerrero se reportan 86 especies (*La flora de musgos de México*, Sharp 1994; en Romeu, 1996). Sin embargo, los listados detallados de briofitas para dicho estado no se

encuentran disponibles o actualizados. Por lo que, no ha sido posible corroborar si las especies identificadas y analizadas en el presente estudio se encuentran reportadas para este estado.

Para cada una de las especies de musgos que se encuentran colonizando el jal “La Concha” existe información que describe sus propiedades y las condiciones ambientales en las que han sido colectadas:

1. *Bryum argenteum* es una especie cosmopolita que se desarrolla generalmente en suelos donde la vegetación ha sido destruida; considerado como un colonizador importante durante una sucesión vegetal (Pisa, 2014).
2. *Anoetangium aestivum* se encuentra en grietas y salidas de rocas calcáreas o silíceas, en tierras altas y se desarrolla junto con otros musgos en forma de consorcios (Delgadillo *et al.*, 1987).
3. *Hyophila involuta*, se distribuye en sitios con variaciones de humedad (de baja a media), en suelos arenosos y, geográficamente, se encuentra en el este de Estados Unidos, México y Sudamérica (da Silva Brito, 2009).
4. *Didymodon rigidulus* se encuentra en suelos y rocas calcáreas en zonas elevadas (de 60 a 500 msnm); se distribuye en México, Sudamérica, Europa y África (Delgadillo, 2004).
5. *Scopelophila lingulat* es un musgo cosmopolita, que se desarrolla en suelos o rocas con pH ácidos (~2.0), en sitios ricos en Fe y Cu (Aikawa, 2014).
6. *Brachymerium systylium* se distribuye en México sobre suelos y rocas con altos compuestos calcáreos (Delgadillo, 1987).
7. *Gymnostomum* es un género con amplia distribución en México (centro y sur) y se desarrolla suelos calcáreos. Las especies de este género producen precipitados de carbonatos (Zander, 2007).
8. El caso en particular de *Scolophelia lingulata* + *Hyophila involuta*, el primero se distribuye en sitios con pH ácidos (como los jales mineros) y el segundo se puede encontrar en sitios contaminados; lo que justifica su presencia de ambos en “La Concha”. Del consorcio *Bryum argenteum* + *Didymodon rigidulus*, la primera se distribuye en sitios donde la vegetación ha sido destruida y *D. rigidulus* se distribuye en zonas

elevadas (de 60 a 500 msnm); sin embargo, en el presente estudio, la altitud del jal es de ~1700msnm, por lo que este musgo se encontraría fuera de su distribución altitudinal normal. *Gymnostomum* + *Hyophila involuta*, el primero al ser encontrado en suelos calcáreos, y siendo capaz de producir precipitados calcáreos facilita el crecimiento de *H. involuta* se desarrolla en sitios con impacto ambiental con pH básicos.

Variación del pH en sustrato y en la biomasa de los musgos

El pH es un factor importante en la nutrición vegetal, ya que este es el principal factor de la movilidad de los nutrientes del sustrato a la planta (Fernández-Linares *et al.*, 2006). La variación del pH encontrado en las muestras de sustrato analizadas fue amplia (de 3.7 a 8.7). Las muestras del sustrato de *Brachymerium systylium* tuvieron el valor máximo y mínimo de este parámetro. El sustrato de *H. involuta* tuvo un pH ácido, pero al estar interactuando con otra especie tiene la capacidad de establecerse en un pH neutro o básico. En investigaciones previas reportan una variación importante en el pH de este jal (de 2.9 a 7.0) (Corrales-Pérez & Romero, 2013; Montero, 2018). Sin embargo, la concentración elevada de sulfuros en el sustrato de este jal propicia a que tenga una tendencia hacia valores de pH ácidos (<2.0) (Talavera-Mendoza *et al.*, 2005, 2006, 2016). Estudios realizados en otros jales de México han referido valores de pH similares. Carrillo-González (2005) encontró un pH alcalino en jales del estado de Zacatecas y pH de ligeramente ácido a neutro en jales de Temascaltepec, Estado de México. En el estado de Hidalgo, Hernández-Acosta (2009) reporta pH neutros y débilmente alcalinos en jales con presencia de vegetación. Por otro lado, Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach (2006) estudiaron jales de cianuración en el Distrito Minero de Guanajuato y encontraron valores de pH medianamente alcalinos.

Los musgos identificados en el jal “La Concha” mostraron la capacidad de desarrollarse en diferentes condiciones de pH. Algunas muestras de sustrato del jal tienen una tendencia hacia un pH alcalino, como se observó en sustrato del musgo Br1 de Bryaceae (pH de 8.73). Sin embargo, otras tienen tendencia hacia la acidez como el sustrato de *Brachymerium systylium* (Bs2) (pH = 3.7), lo que demuestra la capacidad de los musgos de tolerar condiciones de acidez, como en los jales mineros.

La variación de los valores de pH del presente trabajo puede ser una consecuencia de la actividad metabólica de los musgos, porque tienden a modificar las condiciones de los

sustratos que habitan (desde calcáreos, alcalinos o ácidos) (Saiz-Jiménez, 1981). Los musgos alteran el pH de los sustratos a través de procesos bioquímicos, como la segregación de flavonoides en respuesta al estrés oxidativo o por los tipos de nutrientes disponibles (López, 2007; Siwach *et al.*, 2021). La acidificación de sustratos la realizan para la obtención de cationes (Ca^{2+} y Mg^{2+}) y, en consecuencia, liberan iones H^+ (Gonzales, 2013).

Los musgos no poseen las mismas barreras anatómicas que las plantas vasculares (Nikishiyama *et al.*, 2004; Shaw & Renzaglia *et al.*, 2004). La acumulación de ciertos compuestos tiene una función adaptativa a condiciones de estrés (como flavonoides), como los cambios bruscos de pH (López, 2007). La denominación de *especie indicadora* para los musgos es una consecuencia de su permeabilidad porque son capaces de reflejar el estado en el que se encuentra el ambiente donde se desarrollan a través de su composición química en su biomasa (Gonzales, 2013); como se observó en la similitud del pH de sustrato y de biomasa vegetal. Por lo que, se corrobora una de sus propuestas, donde menciona que el pH el tejido vegetal debe ser lo más cercano al del sustrato donde se desarrolla.

Concentración del fósforo en sustrato y en biomasa de los musgos

El fósforo es un elemento determinante para la productividad del suelo porque, junto con otros nutrientes, permiten la proliferación de una cubierta vegetal (Gliessman, 2002; Corrales *et al.*, 2015). La movilidad de este elemento en sus diferentes formas químicas depende del pH del suelo o sustrato, y su abundancia está ligada a la actividad microbiana del sustrato (Ara *et al.*, 2018; von Tucher *et al.*, 2018). En este estudio se emplearon dos métodos, el primero para detectar fosfatos en suelos neutros a alcalinos, donde se encuentran la mayoría de las muestras del jal. De acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000, la mayoría de las muestras del jal tienen una baja concentración de fosfatos ($<5.5 \text{ mg Kg}^{-1}$); solo dos muestras tuvieron concentraciones altas de este anión ($>11 \text{ mg Kg}^{-1}$; Ba+Dr2 y Bs1). La disponibilidad de fosfato en el suelo es a menudo limitada por las reacciones de fijación química o de precipitación; las cuales, generan formas insolubles de fosfatos (Filippelli, 2020). Los fosfatos cálcicos insolubles predominan en suelos calcáreos; mientras que los fosfatos de Fe y Al son formados en suelos ácidos (Neilsen *et al.*, 1992). La absorción por minerales arcillosos afecta la disponibilidad de fosfato bajo condiciones neutras o ligeramente ácidas (Silva, 1998). Es posible que la cuantificación de fosfatos en las muestras del jal se dificultara

por el alto contenido de Fe o bien se encontrara en formas insolubles por efecto de la heterogeneidad del pH (Filippelli, 2020).

El análisis de la composición química de los tejidos vegetales es una medida de la proporción de nutrientes que dispone una planta para su crecimiento; esta técnica es utilizada para describir la relación que existe entre la concentración de fósforo en tejido vegetal y el medio ambiente (Barrera, 2008). Para asegurar la determinación de este elemento en las muestras de biomasa de los musgos del jal “La Concha”, se consideró su concentración total (fósforo total). De acuerdo con Delgado (1986), la capacidad de los musgos de obtener el fósforo de un sustrato y utilizarlo en su crecimiento, depende de su potencial metabólico. Por lo que, la concentración de fósforo puede variar estacionalmente, porque la actividad metabólica (crecimiento y senescencia) de los musgos dependen de las condiciones ambientales (Hasan *et al.*, 2016). En condiciones nutricionales intermitentes, los musgos tienen una eficiencia alta en la translocación de fósforo, que los hace un reservorio importante de este nutriente en los ecosistemas (Xin *et al.*, 2020). Esta capacidad de obtención y de almacenamiento, hace que los musgos sean un componente importante en el ciclo biogeoquímico del fósforo en el suelo (Crowley & Bedford, 2011). Sin embargo, como se mencionó antes, la humedad ambiental define la capacidad de los musgos para la obtención de este elemento. Por ejemplo, en musgos del género *Sphagnum* que presentaban estrés hídrico estacional adquieren una coloración café y su capacidad de absorción de fósforo es más lenta que en su estado hidratado (color verde en biomasa vegetal) (Chapin *et al.*, 1987; Vicherová *et al.*, 2015). Muchos de los musgos del jal “La Concha” que fueron analizados, fueron colectados en época de secas y presentaban la coloración café (estrés hídrico); lo que, explicaría la baja concentración de fósforo en su biomasa. Esto se justifica con el hecho de que, en jales mineros en condiciones limitadas de humedad, el fósforo no está disponible por la nula oxidación de su sustrato (Romero *et al.*, 2007; Montero, 2018). Es importante mencionar que, en el ejemplar Br1 de Bryaceae, en su sustrato no fue posible la detección de fosfatos a pesar del alto contenido de materia orgánica; pero su biomasa tuvo la mayor concentración total de este elemento.

Contenido de materia orgánica en sustrato y carbono orgánico en biomasa de los musgos

La materia orgánica (MO) en el suelo tiene una gran importancia por ser una fuente primaria de nutrientes (N, P y S), participa en la regulación térmica del suelo, ayuda a la retención de agua, participa en la capacidad amortiguadora del suelo para evitar cambios bruscos de pH (Aguilera, 2000). La presencia de MO es un indicador de actividad biológica porque en el suelo, los microorganismos son quienes degradan el material orgánico que se acumula en la superficie (Atlas & Bertha, 2008). En términos generales, este parámetro es un indicador de la calidad del suelo, ya que describe parte del proceso de reciclaje de nutrientes y contribuye con la capacidad de intercambio catiónico (Sollins *et al.*, 2006). El contenido máximo de MO en las muestras del jal “La Concha” fue 1.04%; cuantificado en el sustrato de *Bryum argenteum* (Ba2). Mientras que el %MO mínimo se encontró en el sustrato de *Gymnostomum* + *Hyophila involuta*. En general, todas las muestras analizadas del jal son catalogadas de muy bajas a bajas en su contenido de MO (NOM-020-RECNAT-2000, apartado AS-07).

Los musgos son considerados como *microsistemas ecológicos*, debido al aporte y descomposición del material orgánico que hacen al ambiente; ayudando a aumentar la disponibilidad de nutrientes que propician el crecimiento de otras plantas e incrementan la fertilidad del suelo (Mansilla, 2008; Xin *et al.*, 2020). Por lo que, los musgos que colonizaron el jal “La Concha” podrían estar aportando el material orgánico inicial para llevar a cabo la sucesión ecológica que propiciaría el establecimiento de comunidades vegetales complejas (Merrit *et al.*, 2010). Los musgos juegan un papel importante en la restauración de ecosistemas de zonas áridas por la adición de MO que realizan; además de otorgar cohesión al suelo para evitar la erosión hídrica y eólica de partículas (Zhao *et al.*, 2009; Condon & Pyke, 2016). Estas funciones de los musgos podrían estar siendo aplicadas en el sustrato del jal “La Concha”, ayudando a evitar la dispersión de sus partículas y, en consecuencia, de los contaminantes que contiene como los metales pesados.

El contenido de carbono orgánico (CO) en la biomasa vegetal es de ~50%; sin embargo, su contenido varía de 32 a 40% dependiendo la condición ambiental del sitio y el tipo de vegetación (edad y especie), principalmente (Gayoso, 2005). En musgos se ha observado que el contenido de CO es variable y depende de la presencia de contaminantes y

elementos nutritivos (fósforo, principalmente); por lo que, en sitios conservados el contenido de CO está entre 20 al 40% (Báez, 2014). La MO deriva de los musgos tiene una tasa de descomposición lenta (p. ej. 0.0005 a 0.15 año⁻¹ en *Sphagnum*); por lo que, esta MO tiene el potencial de acumularse en la capa más externa del suelo o sustrato y puede incrementarse debido a la diversidad bacteriana y fúngica que está asociada en su tejido (Bona *et al.*, 2013).

Capacidad de intercambio catiónico y concentración de sulfatos en sustrato

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se define como la suma de todos los cationes de cambio que se pueden intercambiar a un determinado pH y es un reflejo de la capacidad del suelo para retener e intercambiar nutrientes (Salas, 2002; Huaynates, 2014). La red de cargas negativas que definen a la CIC es dependiente de la textura del suelo: una textura gruesa presenta una menor CIC (p. ej. arenas claras: 3-5 meq/100g suelo), mientras que una textura fina presenta una mayor CIC (p. ej. arcillas: 20-50 meq/100g suelo) (Jones & Olson-Rutz, 2016). De acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000, la CIC de los sustratos asociados a los musgos del relave “La Concha” es baja. Esta condición de CIC es una consecuencia del alto contenido de arenas presentes en este jal (textura gruesa) (Arias-Muñoz & Contreras-Vázquez, 2022; en proceso de titulación). Los jales mineros tienen una composición heterogénea de material sólido (polvo, rocas, escoria y lodo) y líquido (aguas residuales y lixiviados) (Kossof *et al.*, 2014) y, en consecuencia, una textura gruesa (Echevarría & Morel, 2015). Este tipo de textura es característica de este relave; por lo que, tiene baja estabilidad, pocos nutrientes y una movilidad alta de EPT (como los metales pesados) (Armienta-Hernández & Méndez-Ramírez, 2012; Dótor-Almazán *et al.*, 2014).

Los sulfatos son uno de los principales aniones presentes en el suelo (Andrades, 2014). La solubilidad de los sulfatos es variable, lo que propicia que su concentración sea heterogénea en la superficie del sustrato (Tabatabai, 1987). Los sulfatos de sodio y potasio son empleados en la nutrición vegetal (mayor solubilidad); mientras que los sulfatos de magnesio dependen exclusivamente del pH del sustrato (Ibáñez, 2004; Idrovo, 2008). Debido a la variación de concentración de sulfatos en las muestras del jal “La Concha”, se hicieron dos grupos para su análisis: el primero para concentraciones por debajo de 1.0 mg Kg⁻¹; lo cual, es mucho menor a lo reportada por Montero (2018) (concentración media baja de 20.61 mmolL⁻¹ lo cual equivale a ~368 mg Kg⁻¹). El segundo grupo para concentraciones mayores

(de 104.61 a 457.19 mg Kg⁻¹ SO₄²⁻); valores que se acercan a la media mínima reportada con anterioridad por Montero (2018). La variación en las concentraciones de este anión puede ser una consecuencia de su aprovechamiento o acumulación de los musgos (Skrzypek *et al.*, 2008; Hermsen *et al.*, 2010). Esta variación también puede ser una consecuencia de la época de muestreo, porque se colectaron en el inicio del periodo de sequía que es cuando los musgos tienen una menor actividad metabólica (Cove *et al.*, 2006; Green *et al.*, 2011).

Debido a su permeabilidad, musgos han sido utilizados como indicadores de contaminación atmosférica a través de la absorción de los componentes de la lluvia ácida y de especies químicas de azufre en suelo (Liu *et al.*, 2009; Xiao *et al.* 2010, 2015). Los musgos tienen la capacidad de asimilar al azufre y utilizarlo para la síntesis de varios componentes celulares (aminoácidos, co-enzimas y metabolitos secundarios); solo que sus rutas metabólicas son diferentes a lo descrito en plantas vasculares (Kopriva *et al.*, 2007). En relaves mineros con formación del drenaje ácido de mina, los musgos como planta colonizadora primaria, presentaba una concentración baja de azufre ($\delta^{34}\text{S}$) y un alto contenido de elementos traza (metales pesados y *tierras raras*) en biomasa (Gałuszka *et al.*, 2020). Por lo que, los musgos colonizadores del jal “La Concha” podrían ser utilizados para indicar el estado de oxidación de los sulfuros presentes en el sustrato y sería interesante describir las rutas metabólicas que emplean para su metabolismo o exclusión. Esto último, debido a su sensibilidad a algunas especies químicas de azufre que eran usadas para controlar su crecimiento (Nash & Nash, 1974; Goossens, 1980).

Potencial de bioextracción de metales pesados por los musgos colonizadores del jal “La Concha”

Los metales pesados (MP) son elementos potencialmente tóxicos (EPT) que al estar en concentraciones ambientales altas se consideran un peligro para la salud (Ali *et al.*, 2019; Rehman *et al.*, 2020). Los MP son todos aquellos elementos que tienen una densidad mayor a 5.0 y representan el 35% de la tabla periódica; algunos son nutrientes importantes para el desarrollo animal y vegetal (p. ej. Cu, Fe, Mn, Mo y Zn) (Abdu *et al.*, 2017). Las principales fuentes de contaminación de MP son las actividades antropogénicas, como: residuos industriales y de minería; cenizas de carbón; desechos urbanos, agrícolas y animales; fertilización con fosfato; compost o lodos de depuradora; aplicación de pesticidas

(fungicidas) o riego con aguas residuales (Kim *et al.*, 2015). De acuerdo con los datos ecológicos y toxicológicos, los MP (incluyendo metaloides) forman la siguiente sucesión de acuerdo con su grado de peligrosidad en los suelos: Se > Tl > Sb > Cd > V > Hg > Ni > Cu > Cr > As > Ba (Vodyanitskii, 2016). Para que el ion de algún elemento metálico pueda ser considerado como un EPT debe generar un efecto fisiológico adverso sobre un organismo (Ali *et al.*, 2019; Rehman *et al.*, 2020). Los cationes metálicos divalentes (Mn^{2+} , Fe^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+}) son estructuralmente muy similares entre sí: diámetros iónicos entre 138 y 160pm, y una doble carga positiva. De esta manera, pueden desplazar a otros cationes con funciones fisiológicas importantes en la célula (Sanaei *et al.*, 2020). Por ejemplo, la sustitución de Ca^{2+} por otros metales en proteínas de la membrana provoca desórdenes funcionales (Nies, 1999). Elementos sin propiedades tóxicas en baja concentración, como Zn^{2+} , Ni^{2+} y, especialmente, Cu^{2+} son tóxicos en concentraciones mayores (Csuros & Csuros, 2002; Volke-Sepúlveda *et al.*, 2005).

En el suelo, la toxicidad de los MP depende de su disponibilidad (Duffus, 2001; Volke-Sepúlveda *et al.*, 2005; Violante *et al.*, 2010). La *biodisponibilidad* de los MP es un tema constante de discusión. En el suelo, la biodisponibilidad depende de factores físicos (estructura y penetrabilidad), químicos (potencial Redox, especiación y concentración) y biológicos (efecto de la actividad microbiana, como los ácidos orgánicos generados por micorrizas) (Ernst, 1996). Generalmente, la biodisponibilidad de los MP está relacionada con la capacidad de las plantas para su absorción (*fitodisponibilidad*) (Kim *et al.*, 2015). Para la planta, esta biodisponibilidad depende del tipo de suelo, condiciones climáticas, propiedades genéticas de la planta (genotipo), procesos activos y pasivos de transferencia, tipo de sistema radicular y cambios estacionales (Zhang *et al.*, 2010). La *fitoextracción* es considerada la mejor alternativa para el tratamiento de suelos contaminados con MP (Chojnacka *et al.*, 2015); sin embargo, es un proceso que depende de diversas variables.

Los musgos son especies vegetales ampliamente utilizadas para el monitoreo de los niveles de contaminación en los suelos debido a su gran capacidad de acumulación de contaminantes (Maija, 2003; Saalema *et al.*, 2003). Entre los contaminantes que los musgos pueden absorber con facilidad están los MP (Flores-Ortega *et al.*, 2013). En jales mineros,

musgos de diferentes especies pueden establecerse y son indicadores de contaminación tipos específicos de MP (Ohnuki *et al.*, 2002; Balabanova *et al.*, 2017; Karpinets *et al.*, 2017).

En el presente estudio, cinco MP fueron seleccionados para analizar el potencial de bioextracción de los musgos que colonizan el jal “La Concha”:

- I. El hierro (Fe) es un elemento que es empleado durante la fotosíntesis como donador de electrones y en la síntesis de la clorofila. La concentración mínima de Fe que fue cuantificada en las muestras del jal fue 1017.54 mg Kg⁻¹; mientras que el valor normal reportado en la NOM-021-RECNAT es de >4.5 mg Kg⁻¹. Lo que demuestra que las concentraciones de Fe en “La Concha” rebasan el valor normal mínimo. Sin embargo, las concentraciones de Fe cuantificadas en el jal “La Concha” (de 1017.57 mgKg⁻¹ a 9895.65 mgKg⁻¹) se encuentran por debajo de lo observado en otros sitios mineros. Por ejemplo, Medel *et al.* (2008) reportan concentraciones de 12185 mg Kg⁻¹ en un jal de nueva formación, y 11676 mg Kg⁻¹ en un jal de mayor antigüedad. Romero (2011), menciona que la concentración de Fe en los jales varía de acuerdo con las condiciones ambientales; pero la concentración promedio estable es de 173000 mg Kg⁻¹. Por lo que, la disminución de la concentración total de Fe en el jal “La Concha” puede ser una consecuencia de su movilización a través de lixiviados. Otro factor que puede influir son las especies vegetales que lo colonizan (Gómez-Bernal *et al.*, 2010). Sin embargo, como se mencionó anteriormente, diversos factores influyen en la absorción de MP por las plantas. Destacando la especie vegetal, el tipo de suelo, las características fisicoquímicas del suelo y las condiciones climáticas (Hooda *et al.*, 1997; Chojnacka *et al.*, 2005). Así como los factores que influyen en su distribución entre los diferentes órganos vegetales (Angelova *et al.*, 2004). En el caso particular de los musgos, son organismos vegetales que tienen una alta afinidad por los MP (Aikawa, 2014), La concentración de Fe en la biomasa de los musgos analizados va de 2818 a 6634 mg Kg⁻¹, que son similares a las concentraciones encontradas en sustrato. Algunas especies de musgos, como *Scopelophila lingulata*, tienen la capacidad de hiperacumular el Fe a nivel celular o géneros como *Hyophila* lo retienen en los filidios (Aikawa, 2014; Nakajima, 2019). El potencial de bioextracción de los musgos del relave “La Concha” muestra que 10 ejemplares son acumuladoras de Fe. Pero, las muestras restantes, pueden hiperacumular

este elemento (*Bryum argenteum* Ba2, *Anoectangium aestivum* Aa1, *Gymnostomum* + *Hyophila involuta* (G+Hi 1), *Bryum argenteum* + *Didymodon rigidulus* (Ba+Dr2) y *Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta* (Sl+Hi2). Además, se observó que dos muestras podían acumular una concentración mayor de Fe (Sl+Hi2 y Ba+Dr2). En el primer caso (*Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*), se encuentra reportado que ambas especies presentan esta característica de hiperacumular el Fe en sus tejidos. Sin embargo, no existen reportes en el que se mencione si estos organismos se encuentran juntos. En el segundo caso (*Bryum argenteum* + *Didymodon rigidulus*), ninguna de las especies se encuentra reportada como hiperacumuladora de Fe. Solo *B. argenteum* se ha reportado como acumulador de este elemento. Esto muestra la factibilidad del uso de estos musgos para remover el Fe de sitios contaminados.

- II. El cobre (Cu) se encuentra en todos los tipos de rocas. En el suelo puede sufrir procesos de adsorción, de oclusión y de coprecipitación; puede formar complejos y quelatos orgánicos o ser fijado por los microorganismos (De Haan & Zwerman, 1978; Kabata – Pendias & Pendias, 1984; Andreu, 1991). Debido a su baja movilidad, el Cu no se cataloga como un elemento dañino para el ambiente. Sin embargo, Bowie & Thornton (1985), consideran que la concentración anómala de Cu es cuando se encuentre a partir de 2000 mg Kg⁻¹. La NOM-021-RECNAT solo considera un rango mayor a 60 mg Kg⁻¹, y no contempla los posibles efectos tóxicos de este elemento a altas concentraciones. Las muestras de sedimento del jal “La Concha” se encuentran en el intervalo de 40 a 216.02 mg Kg⁻¹. Por lo que, las concentraciones de Cu están dentro de los límites permitidos por Norma. Sin embargo, Dótor-Almazán et al. (2007) reportan una concentración de 304 mg Kg⁻¹ de Cu, lo cual muestra una posible remediación del sitio por parte de los musgos. El cobre es un metal esencial para el crecimiento de las plantas; sin embargo, en exceso puede inhibir su crecimiento (Yruela, 2005). Davies (1979) menciona que los contenidos de Cu están en función de su abundancia en el suelo. Sin embargo, se reporta que en muchas especies vegetales las concentraciones mayores a 20 mg Kg⁻¹ de Cu son tóxicas. Algunas plantas pueden soportar concentraciones mayores a los 100 mg Kg⁻¹ de Cu (Leep et al., 1984). Los musgos analizados en el presente estudio tuvieron una concentración de 2.12 a 56.25 mg Kg⁻¹ de Cu, lo cual podría ser una consecuencia de un efecto tóxico generado por este elemento. Pero algunos ejemplares

mostraron una mayor capacidad de acumulación. Por ejemplo, *Bryum argenteum* (Ba1) tuvo una concentración de 19.56 mg Kg⁻¹ y *Bryaceae* (Br 1) de 18.17 mg Kg⁻¹ de Cu. El ejemplar de *Hyophila involuta* (Hi) tuvo 2.12 mg Kg⁻¹, a pesar de ser considerado una especie hiperacumuladora de este metal (Aikawa, 2014). Pero, debido a la concentración alta cuantificada en su sustrato (107.78 mg Kg⁻¹), se puede decir que en este sitio no se encuentra disponible, o bien en particular este organismo no ha completado su desarrollo. De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio, los musgos analizados son catalogados como tolerantes o excluyentes de Cu, por tal motivo este metal no es un agente tóxico para ellos.

- III. El cadmio (Cd) se encuentra naturalmente como sulfuro de cadmio (greenockita y hawleyita) o en forma de carbonato de cadmio (compuesto tóxico para el ambiente). El Cd entra al medio ambiente por medio de fuentes antropogénicas, principalmente (minería, metalurgia, combustión de carbón y petróleo). Este elemento tiende a depositarse y a adherirse a la materia orgánica del suelo y, es soluble en agua (Lide, 1997; Csuros & Csuros, 2002; ATSDR, 2005; Volke-Sepulveda *et al.*, 2005). Debido a esto, las formas de Cd que están en sitios contaminados incluyen complejos de cadmio-cianuro e Cd(OH)₂. Las formas dominantes a pH altos son hidróxidos y carbonatos; mientras que a pH bajos predomina el ion Cd²⁺. Al encontrarse en ambientes reducidos y en presencia de azufre, se forma el sulfuro de cadmio (CdS); compuesto que controla su movilidad debido a su estabilidad. Además, el Cd se precipita en presencia de fosfatos, arseniato, cromato y otros aniones (ATSDR, 2005; Evanko & Dzombak, 1997). Debido a estas características y por las condiciones en las que se encuentra el jal “La Concha”, la presencia de Cd en las muestras de sustrato analizadas se podría encontrar en forma de hidróxidos o carbonatos (pH neutro alcalino) o como Cd²⁺ (pH ácido). Sin embargo, también es posible que este como CdS, lo que disminuiría su movilidad y disponibilidad. Las concentraciones de Cd en las muestras del jal varían entre 0.51 y 163.88 mg Kg⁻¹; valores que están fuera del límite de la NOM-021-RECNAT (0.35 mg Kg⁻¹ Cd). El ejemplar de *Bryum argenteum* (Ba2) mostró valores bajos de acumulación de Cd (3 y 5 mg Kg⁻¹), con un valor mínimo cuantificado de 0.51 mg Kg⁻¹ de Cd. El resto de las muestras sobre pasa estos valores de concentración. Para las plantas, el Cd no es un elemento esencial y no existen mecanismos específicos de entrada a nivel celular

(Clemens *et al.*, 1998). Cuando el Cd llega a entrar a la biomasa vegetal, se aloja en la raíz; sin embargo, este elemento forma quelatos con algunos ácidos orgánicos como el citrato y otras moléculas de proteínas ricas en cisteína (Clemens 2006; Domínguez-Solís *et al.*, 2004). Estas proteínas ayudan al transporte a nivel celular y permite que el Cd se acumule en vacuolas y una pequeña fracción se dispersa en el tejido celular. El efecto del Cd en las plantas ha sido estudiado (Sanitá di Toppi & Gabrielli 1999; Benavides *et al.*, 2005). Los mecanismos de toxicidad del Cd varían entre especies, pero de manera general, interfiere en la entrada, transporte y utilización de elementos esenciales (Ca, Mg, P y K) y del agua, provocando desequilibrios nutricionales e hídricos en la planta (Poschenrieder *et al.*, 1989; Sandalio *et al.*, 2001; Singh & Tewari 2003). Las concentraciones de Cd encontradas en los musgos del jal fueron de 0.19 a 1.73 mg Kg⁻¹, lo cual hace considerar que los musgos no absorben la cantidad de Cd necesaria del sustrato para poder ser denominados acumuladores. Los efectos del Cd en los musgos del jal tienen que ser analizados a largo plazo, porque los mecanismos de adaptación a sitios contaminados (Shah & Nongkynrich, 2007). El análisis del potencial de bioextracción denota que los musgos del jal “La Concha” son tolerantes a este metal e inclusive podrían estarlo excluyendo; excepto en *Bryum argenteum* (Ba2) que tuvo la misma concentración que en sustrato.

- IV. El plomo (Pb) es un metal que se encuentra en pequeñas cantidades en la corteza terrestre en forma de galena (PbS), anglesita (PbSO₄) y la curosita (PbCO₃). Sin embargo, la actividad humana eleva la concentración de este elemento en el suelo a través de procesos de adsorción, intercambio iónico, precipitación y acomplejamiento con la materia orgánica en ácidos húmicos y fúlvicos. El Pb puede formar compuestos poco solubles, como carbonato de plomo y el PbS (Evanko & Dzombak, 1997; Volke-Sepúlveda *et al.*, 2005). Por este motivo se intuye que las muestras donde se encuentran los musgos *Hyophila involuta* (Hi) y *Brachymerium systylium* (Bs2) presentan carbonato de plomo o PbS, que son las muestras más estables analizadas con respecto a este metal. Sin embargo, la concentración de este elemento varió de 932.4 a 1923.2 mg Kg⁻¹. De acuerdo con la NOM-021-RECNAT, el límite de Pb es de 35 mg Kg⁻¹; por lo que, todas las concentraciones en los sustratos del jal lo rebasan. Las muestras analizadas representan un gran riesgo ambiental, porque la concentración mínima encontrada es de

524.46 mg Kg⁻¹ en el área donde crecen los musgos *Bryum argenteum* + *Didymodon rigidulus*. La concentración máxima encontrada es de 2768.31 mg Kg⁻¹, en el cual crece la muestra *Anoetangium aestivum*. La fitotoxicidad por Pb se manifiesta en suelos ácidos, afectando el crecimiento y la formación de estructuras. Actualmente se conoce poco de los mecanismos específicos de absorción de este elemento; sin embargo, se sabe que, por el intercambio catiónico, los metales son capaces de ingresar a los tejidos vegetales (por raíz en plantas superiores o por las paredes celulares en briofitas) (Barcelo *et al.*, 2005). La absorción de Pb se relaciona con el incremento de pH (de 3.0 hasta 8.5); sin embargo, la actividad microbiana puede aumentar su disponibilidad para las plantas. Las ectomicorrizas influyen en la entrada, transporte y toxicidad del Pb²⁺ (Marschner *et al.*, 1996). Es posible que los musgos encontrados en el jal “La Concha” podrían absorber el Pb al modificar el pH del sustrato. Las muestras con mayor concentración de Pb se cuantificaron en un amplio rango de pH (de 3.7 a 8.73) en el sustrato. A nivel de biomasa, la muestra de *Anoetangium aestivum* (Aa2) presentó la concentración mayor de Pb en biomasa (10654.51 mg Kg⁻¹), seguida de las tres muestras cercanas a *Cupressus* (*Gymnostomum* + *Hyophila involuta*). La muestra con menor concentración de Pb (58.19 mg Kg⁻¹) fue cuantificada en *Hyophila involuta* (Hi). La solubilidad del Pb en el tejido vegetal se ve dificultada por la presencia de fósforo y por el pH alcalino (Bolan *et al.*, 2003a). Esto pudo verse reflejado en la biomasa de *Anoetangium aestivum* (Aa2), que tuvo la mayor concentración de Pb, pero la menor concentración de fósforo y un pH de 8.3. Por lo que, estas variables pueden ser determinantes para que el potencial de bioextracción del Pb alcance la categoría de hiperacumulación en algunos ejemplares de musgos. Sin embargo, otros musgos del relave alcanzan la categoría de excluyentes (2 muestras), tolerantes (3 muestras) y acumuladores (2 muestras). Para poder conocer la causa de estas variaciones en la capacidad de absorción es necesario realizar más estudios en particular los que ayuden a identificar la posible relación que existe entre el Pb y los microorganismos que afectan su disponibilidad en el jal.

- V. El zinc (Zn) tiene una concentración promedio de 40 mg Kg⁻¹ en la corteza terrestre y se extrae de la esfalerita ((ZnFe)S). A nivel celular, es un componente importante de enzimas. Sin embargo, el exceso de Zn puede impedir la absorción de otros elementos como el Cu (Lide, 1997; Csuros & Csuros, 2002). Las concentraciones de Zn en agua,

aire y suelo se encuentran en aumento debido a las actividades humanas. En el ambiente, este metal permanece en el suelo en forma de compuestos insolubles. Sin embargo, es uno de los metales pesados más móviles debido a que se encuentra en forma soluble a pH neutro o ácido. A pH alcalino puede formar carbonatos e hidróxidos. Bajo condiciones reductoras y en concentraciones elevadas en sitios contaminados puede precipitar fácilmente como $Zn(OH)_2$, $ZnCO_3$, ZnS , o $Zn(CN)_2$ y co-precipitar con óxidos de Fe o Mn (Evanko & Dzombak, 1997; Volke-Sepúlveda *et al.*, 2005). Las concentraciones de Zn encontradas en los sustratos del jal se encuentran en el intervalo de 51.31 a 438.63 mg Kg^{-1} , que exceden el límite mundial de este metal (Csuros & Csuros, 2002). Pero Bowie & Thornton (1985) reportan una concentración anómala a partir de 10000 mg Kg^{-1} de Zn. Mientras que la NOM-021- RECNAT considera normales concentraciones mayores a 1.0 mg Kg^{-1} , sin mencionar límites o bien niveles anormales del metal sedimentos y suelos. El pH en las muestras analizadas de sustrato del jal “La Cocha” se encuentran de neutro a alcalino, lo cual podría sugerir que este elemento no se encuentra en una fracción móvil y que pueda ser asimilado por la vegetación. En las plantas este elemento es importante para el metabolismo de hormonas al regular el nivel de auxinas a través de la síntesis del aminoácido triptófano (Bark & Helmke, 1993). En condiciones limitadas de Zn se afecta el desarrollo de estructuras reproductivas, ocasionando infertilidad en los organismos (Sagardoy *et al.*, 2008; Flores *et al.*, 2009). En las muestras analizadas, las concentraciones menores se cuantificaron en los musgos que se encontraron en pH ácidos (18.91, 45.66 y 58.21 mg Kg^{-1}) y las concentraciones mayores se cuantificaron en las muestras con valores de pH por arriba de 8.0. Un pH de 8.0 es considerado ligeramente alcalino (NOM-021- RECNAT); por lo que, la capacidad de absorber Zn en estas condiciones está fuera de lo reportado en la literatura. La fitoextracción del Zn en sitios contaminados ha sido ampliamente estudiada, pero solo se conocen 11 taxones hiperacumuladores, siendo *Thlaspi caerulescens* la más estudiada. La escasez de plantas hiperacumuladoras de Zn supone la existencia de pocas alternativas en la elección de especies para su fitoextracción en suelos contaminados. Ello puede derivar en un descenso en el rendimiento del proceso por una excesiva dependencia de las especies conocidas a de terminadas condiciones estacionales, climáticas o edáficas (Angle & Linacre, 2005). Especies vegetales como

Salix viminalis, *Cistus ladanifer* y *Cytisus scoparius* han sido contrastadas en diversos trabajos como especies pseudometalófitas capaces de colonizar y crecer sobre suelos con altas concentraciones en Zn. *Salix viminalis* es una especie de reconocido potencial fitocorrector, con capacidad de acumular altas cantidades de Cd y Zn (Landberg & Greger, 1996; Punshon & Dickinson, 1997; Vandecasteele *et al.*, 2002; Stoltz & Greger, 2002; Rosselli *et al.*, 2003; Vandecasteele *et al.*, 2004; Hamer *et al.*, 2003; Meers *et al.*, 2005). Sin embargo, estos estudios se encuentran limitados a plantas leñosas y herbáceas, o exóticas. Los musgos presentes en el jal “La Concha”, muestran un comportamiento de hiperacumulación de Zn, siendo el consorcio *Bryum argenteum* + *Didymodon rigidulus* el que tiene el mayor potencial de acumulación.

Integración de los análisis estadísticos

Al aplicar un análisis de correlación fue posible detectar la conexión entre los parámetros estudiados en el presente trabajo. Por ejemplo, la relación que existe entre el pH y tres EPT (Cu, Pb y Zn) con su acumulación en la biomasa de los musgos. El efecto del pH ha sido estudiado en varios sistemas. Confirmando la fuerte influencia que tiene el pH en el proceso de absorción de diferentes metales; pero aún se debe considerar la influencia que existe entre el catión metálico y la superficie activa del organismo con la variación del pH (Schiewer *et al.*, 1997; Pagnanelli *et al.*, 2003). Las relaciones obtenidas entre las especies de musgos con la variación del pH y la concentración de los EPT en el sustrato y en biomasa, hace inferir que estos organismos son capaces de colonizar y adaptarse a estos sitios contaminados e, inclusive, estabilizarlos. Este comportamiento fue observado los musgos *Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta* (SiHi2) y *Gymnostomum*+*Hyophila involuta*, los cuales, representan los extremos en dicho análisis estadístico y se ubican dentro del mismo cuadrante.

En caso particular del Zn, se han realizado estudios para describir los efectos del estrés generado cuando está en una alta concentración y con variaciones significativas de pH. La variación en la absorción de Zn depende del pH, porque su movilidad está conectada con su solubilidad. Por ejemplo, en *Enterobacter cloacae*, una bacteria marina que es capaz de absorber este elemento debido a un exopolisacárido que es activo en un pH de 4.5 a 5.5

(Hosfall Jr, 2003). En *Fontinalis antipirética*, un musgo que es capaz de retener Zn a través de fitoquelatinas a diferentes temperaturas (Martins *et al.*, 2004).

La relación existente entre el Fe, los sulfatos y la CIC está vinculada con la formación del drenaje ácido de mina (DAM). Este fenómeno es ocasionado por la disminución del pH por la oxidación del azufre, la liberación y movilidad del Fe presente en los minerales nativos (pirita y calcopirita, principalmente). La formación del DAM en el jal “La Concha” propicia la liberación de Fe por la formación de ácidos sulfúrico (Talavera *et al.* 2005). En consecuencia, se incrementa la CIC, que propicia la movilidad y disponibilidad de los iones metálicos y de nutrientes (Sheoran *et al.*, 2010).

El ACP en la biomasa de los musgos encontró una relación entre la concentración del fósforo y el Cd (Bolan *et al.*, 2003b; Hong *et al.*, 2010); debido a la influencia que tienen los fosfatos en la inmovilización de diversos metales (Bolan *et al.*, 2003a). Lo cual podría favorecer su acumulación en los musgos que colonizan el jal “La Concha” al encontrarse disponible en el sustrato

Conclusiones

- I. Los musgos que fueron identificados en el jal “La Concha” se encuentran distribuidos en el territorio mexicano; sin embargo, no fue posible conocer la distribución específica de este grupo en el estado de Guerrero, debido a la falta de actualización de las bases de datos. Por este motivo, una de las perspectivas de este trabajo es poder dar pie a una nueva lista de especies vegetales que se encuentran en el área del municipio de Taxco; considerando a los jales mineros como un punto de referencia para realizar la búsqueda de especies con potencial para la biorremediación de sitios contaminados con metales pesados.
- II. La caracterización química del sustrato adyacente al rizoides de los musgos colonizadores del jal “La Concha” mostró que el pH es el parámetro que determina la dinámica de las condiciones químicas del sitio. Principalmente, la abundancia y la disponibilidad de los nutrientes y de los metales pesados.
- III. El análisis de la composición química de la biomasa de los musgos colonizadores del jal “La Concha” se realizó para conocer sus condiciones fisiológicas y su capacidad de adaptación a las condiciones de estrés presentes en el sitio. Dichos musgos mostraron niveles de carbono orgánico por debajo de la cantidad optima reportada para briofitas. Por lo que, los musgos colonizadores de este jal presentan una deficiencia de nutrientes que podría limitar su desarrollo y su reproducción..
- IV. La concentración de los metales pesados presentes en el sustrato adyacente al rizoides de los musgos colonizadores del jal “La Concha” se encuentran por arriba de los límites permisibles; principalmente, hierro y zinc. La disponibilidad de los metales pesados depende del estado químico en el que se encuentran, porque podrían estar inmovilizados en precipitados. Lo que también podría limitar el potencial de bioabsorción de metales pesados de los musgos presentes en el jal.
- V. El potencial de bioabsorción de metales pesados por los musgos colonizadores del jal “La Concha” depende de su estado fisiológico. La mayoría de los ejemplares fueron colectados en su período de senescencia durante la época de secas. A pesar de lo anterior mostraron la capacidad de acumular los metales pesados analizados. Los musgos mostraron la capacidad de tolerancia e hiperacumulación de hierro y plomo, dos de los

metales más abundante en este jal. Pero, sobresale la capacidad de hiperacumulación de zinc por el consorcio *Bryum argenteum* + *Didymodon rigidulus* debido a que pocas especies vegetales tienen el potencial de absorber y de retener este metal en las condiciones alcalinas de pH.

Referencias

- Abdu, N., Abdullahi, A.A. & Abdulkadir, A. **Heavy metals and soil microbes.** *Environ Chem Lett* 15, 65–84 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10311-016-0587-x>
- Ali, M.U., Liu, G., Yousaf, B. et al. **A systematic review on global pollution status of particulate matter-associated potential toxic elements and health perspectives in urban environment.** *Environ Geochem Health* 41, 1131–1162 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0203-z>
- Ara, Ismat, Islam, Md. Shoffikul, Kashem, Md. Abul, & Osman, Khan Towhid. (2018). **A comparative study of phosphorus availability in an acidic soil and an alkaline soil amended with organic and inorganic phosphorus sources.** *Journal of soil science and plant nutrition*, 18(2), 466-478. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162018005001402>
- Arias-Muñoz, K. & Contreras-Vázquez, G.A. (2022). **Cuantificación y descripción de la materia orgánica presente en un relave minero** [Tesis de licenciatura]. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.
- Armienta Hernández, M.A. & Méndez-Ramírez, M. (2012). **Distribución de Fe, Zn, Pb, Cu, Cd y As originada por residuos mineros y aguas residuales en un transecto del Río Taxco en Guerrero, México.** *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(2),450-462. ISSN: 1026-8774.
- Avarro Pedreño, J., Moral Herrero, Gómez Lucas Y Mataix Beneyto. (1995). *Residuos orgánicos y agricultura*. Universidad de Alicante. Servicio de Publicaciones. Alicante. España, 108 pp
- Barrera, E., & Osorio, F. (2008). Briófitas: Musgos, Hepáticas y antocerotes. En C. (ed), *Biodiversidad de Chile, patrimonio y desafíos* (págs. 340-345). Santiago de Chile: Ocho Libros Editores Ltda.
- Bolan, N. S., Adriano, D. C., & Naidu, R. (2003a). **Role of phosphorus in (Im)mobilization and bioavailability of heavy metals in the soil-plant system.**

Reviews of environmental contamination and toxicology 177, 1–44.
https://doi.org/10.1007/0-387-21725-8_1

- Bolan, N.S., Adriano, D.C., Duraisamy, P. et al. (2003b). **Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. I. Effect of phosphate addition.** *Plant and Soil* 250, 83–94. <https://doi.org/10.1023/A:1022826014841>
- Bona, K.A., Fyles, J.W., Shaw, C. et al. **Are Mosses Required to Accurately Predict Upland Black Spruce Forest Soil Carbon in National-Scale Forest C Accounting Models?.** *Ecosystems* 16, 1071–1086 (2013).
<https://doi.org/10.1007/s10021-013-9668-x>
- Chojnacka, K., Chojnacki, A., Górecka, H., Górecki, H. (2005). **Bioavailability of heavy metals from polluted soils to plants,** *Science of The Total Environment* 337, Issues 1–3, 175-182. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.06.009>.
- Colacelli, N. (2001). *Azufre en el suelo*. TECNIBOOK EDICIONES. Recuperado de [https://books.google.es/books?id=PKOWDwAAQBAJ&lpg=PA9&ots=ZFKWJ5uwLI&dq=Colacelli%2C%20N.%20\(2001\).%20Azufre%20en%20el%20suelo.%20TECNIBOOK%20EDICIONES&lr&hl=es&pg=PA9#v=onepage&q=Colacelli,%20N.%20\(2001\).%20Azufre%20en%20el%20suelo.%20TECNIBOOK%20EDICIONES&f=false](https://books.google.es/books?id=PKOWDwAAQBAJ&lpg=PA9&ots=ZFKWJ5uwLI&dq=Colacelli%2C%20N.%20(2001).%20Azufre%20en%20el%20suelo.%20TECNIBOOK%20EDICIONES&lr&hl=es&pg=PA9#v=onepage&q=Colacelli,%20N.%20(2001).%20Azufre%20en%20el%20suelo.%20TECNIBOOK%20EDICIONES&f=false)
- Condon, L. A., & Pyke, D. A. (2016). **Filling the interspace-restoring arid land mosses: source populations, organic matter, and overwintering govern success.** *Ecology and evolution*, 6(21), 7623–7632. <https://doi.org/10.1002/ece3.2448>
- Corrales-Pérez, Daniel, & Martín Romero, Francisco (2013). **Evaluación de la peligrosidad de jales de zonas mineras de Nicaragua México y alternativas de solución.** *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(3),427-446. ISSN: 1405-3322.
- Cove, D., Bezanilla, M., Harries, P., & Quatrano, R. (2006). **Mosses as model systems for the study of metabolism and development.** *Annual review of plant biology*, 57, 497–520. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105338>

- Crowley, K. F., & Bedford, B. L. (2011). **Mosses influence phosphorus cycling in rich fens by driving redox conditions in shallow soils.** *Oecologia*, 167(1), 253–264. <http://www.jstor.org/stable/41499940>
- Davila Bernal, S. M., & Estrada Montero, J. C. (2020). **Musgo Sphagnum magellanicum para tratamiento de suelos contaminados por hidrocarburos totales de petróleo a nivel de laboratorio,** 2020. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/49603>
- Delgadillo M., C., & Cárdenas, S. (1990). *Manual de Briofitas cuaderno 8.* México, D.F.: Instituto de Biología, UNAM.
- Delgadillo-Moya, C. (2014). **Biodiversidad de Bryophyta (musgos) en México.** *Revista mexicana de biodiversidad*, 85, S100-S105.
- Dótor Almazán, A., Armienta Hernández, M. A., Árcega Cabrera, F., & Talavera Mendoza, O. (2014). **Procesos de transporte de arsénico y metales en aguas superficiales del distrito minero de Taxco, México: Aplicación de isótopos estables.** *Hidrobiológica*. 24(3), 245-256.
- Echevarria, G. & Morel, J. (2015). **Technosols of Mining Areas.** *Tópicos em Ciência do Solo*. 9, 1-20.
- Ernst, W.H.O. (1996). **Bioavailability of heavy metals and decontamination of soils by plants,** *Applied Geochemistry* 11, Issues 1–2, 163-167. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(95\)00040-2](https://doi.org/10.1016/0883-2927(95)00040-2).
- Fernández, M. T. (2007). **Fósforo: amigo o enemigo.** *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 41(2), 51-57.
- Filippelli, GM (2002). **The Global Phosphorus Cycle.** *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 48 (1): 391–425. doi: <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.48.10>
- Frouz, J., Toyota, A., Mudrák, O., Jílková, V., Filipová, A., Cajthaml, T. (2016). **Effects of soil substrate quality, microbial diversity and community composition on the plant community during primary succession.** *Soil Biology and Biochemistry* 99, 75-84, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.04.024>.

- Gałuszka, A., Migaszewski, Z. M., Pelc, A., Trembaczowski, A., Dołęgowska, S., & Michalik, A. (2020). **Trace elements and stable sulfur isotopes in plants of acid mine drainage area: Implications for revegetation of degraded land.** *Journal of environmental sciences* (China) 94, 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.03.041>
- Gálvaez, A., & Sánchez-Gonzalez, A. (2006). **La Importancia del estudio de las briofitas en México y e el estado de Hidalgo.** *Revista de divulgacion de la ciencia* 2, 7-8.
- Gamarra Lezcano, C. C., Díaz Lezcano, M. I., Vera de Ortíz, M., Galeano, M. D. P., & Cabrera Cardús, A. J. N. (2018). **Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo.** *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(46), 4-26.
- Glime, J. M. (2006). *Bryophyte Ecology*. Houghton, Michigan: Michigan Technological University, Department of Biological Sciences.
- Goffinet, B., Buck, W. R., & Shaw, A. J. (2009). **Morphology, anatomy, and classification of the Bryophyta.** En B. Goffinet, & A. J. Shaw, *Bryophyte biology* (págs. 237-268). Cambridge: Cambridge University Press.
- Goossens, M. (1980). **Specific sensitivity of nine mosses to sulfur dioxide.** *Bull. Soc. R. Bot. Belg.* 112:2, 230-242.
- Green, T.G.A., Sancho, L.G., Pintado, A. (2011). **Ecophysiology of Desiccation/Rehydration Cycles in Mosses and Lichens.** In: Lüttge, U., Beck, E., Bartels, D. (eds) *Plant Desiccation Tolerance*. Ecological Studies, vol 215. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19106-0_6
- Hasan, M.M., Hasan, M.M., Teixeira da Silva, J.A. et al. **Regulation of phosphorus uptake and utilization: transitioning from current knowledge to practical strategies.** *Cell Mol Biol Lett* 21, 7 (2016). <https://doi.org/10.1186/s11658-016-0008-y>

- Hazrat Ali, Ezzat Khan, Ikram Ilahi (2019). **Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation.** *Journal of Chemistry*, vol. 2019, Article ID 6730305, 14 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- Hermsen, C., Koprivova, A., Matthewman, C. et al. **Regulation of sulfate assimilation in Physcomitrella patens: mosses are different!**. *Planta* 232, 461–470 (2010). <https://doi.org/10.1007/s00425-010-1190-1>
- Hong, C.O., Chung, D.Y., Lee, D.K. et al. (2010). **Comparison of Phosphate Materials for Immobilizing Cadmium in Soil.** *Arch Environ Contam Toxicol* 58, 268–274. <https://doi.org/10.1007/s00244-009-9363-2>
- Huaynates, J. (2014). **Efecto de la materia orgánica en la absorción de Cadmio en el suelo en la localidad de Supte.** 10, 28-33.
- Karpinets, L., Lobachevska, O., Baranov, V., Diakiv, S., Hnatush, S. (2017). **Total content of nitrogen and heavy metals in the mosses gametophyte and in upper layer of technogenic substrates of the mine dumps.** *Studia Biologica*. 11. 101-108. 10.30970/sbi.1101.521.
- Kendrick, P., & Crane, P. (1997). **The Origin and Early Diversification of Land Plants. A Cladistic Study.** *Geological Magazine*, xiii + 441 ISBN 1 56098 729 4.
- Kopriva, S., Wiedemann, G., & Reski, R. (2007). **Sulfate assimilation in basal land plants - what does genomic sequencing tell us?.** *Plant biology* (Stuttgart, Germany), 9(5), 556–564. <https://doi.org/10.1055/s-2007-965430>
- Kossoff, D., Dubbin, W., Alfredsson, M., Edwards, S., Macklin, M. y Hudson-Edwards, K. (2014). **Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation.** *Geochemistry*. 51, 229-245.
- Labrador, J. (2012). **Avances en el conocimiento de la dinámica de la materia orgánica dentro de un contexto agroecológico.** *Agroecología*, 7(1), 91-108
- Liu, X.Y., Xiao, H.Y., Liu, C.Q., Xiao, H.W., Wang, Y.L. (2009). **Assessment of atmospheric sulfur with the epilithic moss Haplocladium microphyllum:**

Evidences from tissue sulfur and $\delta^{34}\text{S}$ análisis. *Environmental Pollution* 157 (7), 2066-2071, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.02.020>.

- Mauseth, J. D. (2014). **Botany: an introduction to plant biology.** Jones & Bartlett Publishers.
- Merritt R. Turetsky M.R. Turetsky, Michelle C. Mack M.C. Mack, Teresa N. Hollingsworth T.N. Hollingsworth, and Jennifer W. Harden J.W. Harden. (2010). **The role of mosses in ecosystem succession and function in Alaska's boreal forest.** *Canadian Journal of Forest Research.* 40(7): 1237-1264. <https://doi.org/10.1139/X10-072>
- Millán, G., Vázquez, M., Terminiello, A., & Santos Sbuscio, D. (2010). **Efecto de las enmiendas básicas sobre el complejo de cambio en algunos suelos ácidos de la región pampeana.** *Ciencia del suelo*, 28(2), 131-140.
- Moores, A., Passmore, D., & Stevenson, A. (1998). **High resolution palaeochannel records of Holocene valley floor environments in the North Tyne basin, northern England.** En Q. J. Sons, *Fluvial Processes and Environmental change* (págs. 283-310). Chinchester: Brown and T.A.
- Mustin, M. (1987). **Le compost.** Ed. François Dubusc. París, 954 p.
- Nash, T.H., Nash, E.H. (1974). **Sensitivity of mosses to sulfur dioxide.** *Oecologia* 17, 257–263. <https://doi.org/10.1007/BF00344925>
- Navarro-Aviñó, J. P., Alonso, I. A., & López-Moya, J. R. (2007). **Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas.** *Ecosistemas*, 16(2).
- Neilsen, D., Neilsen, G.H., Sinclair, A.H. et al. **Soil phosphorus status, pH and the manganese nutrition of wheat.** *Plant Soil* 145, 45–50 (1992). <https://doi.org/10.1007/BF00009540>
- Nishiyama, T., Wolf, P., Kugita, M., Sinclair, R. B., Sugita, M., Sugiura, C., . . . Hasabe, M. (October de 2004). **Chloroplast Phylogeny Indicates that Bryophytes Are Monophyletic.** *Molecular Biology and Evolution*, 21, 1813-1819.

- Ohnuki, T., F. Sakamoto, N. Kozai, M. Samadfam, T. Sakai, T. Kamiya, T. Satoh, M. Oikaw. (2002). **Application of the micro-PIXE technique for analyzing arsenic in biomat and lower plants of lichen and mosses around an arsenic mine site, at Gunma, Japan**, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 190, Issues 1–4, 477-481. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(01\)01215-0](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(01)01215-0).
- Oishi, Y. & Hiura, T. (2017). **Bryophytes as bioindicators of the atmospheric environment in urban-forest landscapes**. *Landscape and Urban Planning* 167, 348-355, ISSN 0169-2046, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.07.010>.
- Osorio, N. W. (2012). **pH del suelo y disponibilidad de nutrientes**. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4), 1-4.
- Palomares Cruz, D. Y. (2021). **Análisis del nutriente vegetal fosforo en los suelos amazónicos del departamento del Caquetá**.
- Radziemska, M., Mazur, Z., Bes, A., Majewski, G., Gusiatin, Z. M., & Brtnicky, M. (2019). **Using Mosses as Bioindicators of Potentially Toxic Element Contamination in Ecologically Valuable Areas Located in the Vicinity of a Road: A Case Study**. *International journal of environmental research and public health*, 16(20), 3963. <https://doi.org/10.3390/ijerph16203963>
- Raven, P., Evert, R., & Eichhorn, S. (2012). **Biology of plant** (8 ed.). (W. Freeman, Ed.) New York, USA: Macmillan Learning.
- Reboredo, F. H. D. S., Lidon, F. J. C., Pessoa, M. F., Duarte, M. P. A. D. C., & Silva, M. J. (2013). **The uptake of macronutrients by an active silicon accumulator plant growing in two different substrata**. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 25(12 (SI)), 986-993.
- Rehman, I.u., Ishaq, M., Ali, L. et al. **Potentially toxic elements' occurrence and risk assessment through water and soil of Chitral urban environment, Pakistan: a case study**. *Environ Geochem Health* 42, 4355–4368 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00531-4>

- Romero, F. M., Armienta, M. A., y González-Hernández G., (2007). **The solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, México.** *Appl. Geochem.* 22, 109-127
- Rosas Patiño, G., Muñoz Ramos, J., & Suárez Salazar, J. C. (2016). **Incidencia de sistemas agroforestales con Hevea brasiliensis (Willd. ex A. Juss.) Müll.; Arg. sobre propiedades físicas de suelos de lomerío en el departamento de Caquetá, Colombia.** *Acta Agronómica*, 65(2), 116-122.
- Sanaei, F., Amin, M.M., Alavijeh, Z.P. et al. **Health risk assessment of potentially toxic elements intake via food crops consumption: Monte Carlo simulation-based probabilistic and heavy metal pollution index.** *Environ Sci Pollut Res* 28, 1479–1490 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10450-7>
- Sharp, A. J., Crum, H., & Eckel, P. M. (s.f.). **The Moss flora of México memories of the New York Botanical Garden 69:** 1-1113.
- Shaw, J., & Renzaglia, K. (October de 2004). **Phylogeny and diversification of bryophytes.** *American Journal of Botany*, 91(10), 1557-1581.
- Sheoran, V., Sheoran A. & Poonia, P. (2010). **Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: A review.** *International Journal of Soil Sediment and Water.* 3(2), 13
- 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. doi:10.1017/S0266467421000249
- Skrzypek, Grzegorz & Akagi, Tasuku & Drzewicki, Wojciech & Jędrysek, Mariusz-Orion. (2008). **Stable isotope studies of moss sulfur and sulfate from bog surface waters.** *Geochemical Journal.* 42. 481–492. 10.2343/geochemj.42.481.
- Strasburger, E., Noll, F., Schec, H., Schimper, A. F., Sitte, P., Weiler, E. W., . . . Körner, C. (2004). **Tratado de Botánica. Barcelona, España:** Ediciones Omega.
- Tabatabai, ME. (1987) **Physicochemical Fate of Sulfate in Soils,** *JAPCA*, 37:1, 34-38, DOI: 10.1080/08940630.1987.10466197

- Talavera, O. M., Ruiz, J., Villaseñor, E. D., Guzmán, A. R., Cortés, A., Souto, S. A. S., & Bustos, R. R. (2016). **Water-rock-tailings interactions and sources of sulfur and metals in the subtropical mining region of Taxco, Guerrero (southern Mexico): A multi-isotopic approach.** *Applied geochemistry*. 66, 73-81.
- Talavera, O., Armienta, M., Abundis, J. y Mundo, N. (2006). **Geochemistry of leachates from the El Fraile sulfide tailings piles in Taxco, Guerrero, southern Mexico.** *Environmental geochemistry and health*. 28, 243-55.
- Talavera, O., Yta, M., Moreno, R., Dótor, A., Flores, N. y Duarte, D. (2005). **Mineralogy and geochemistry of sulfide-bearing tailings from silver mines in the Taxco, Mexico area to evaluate their potential environmental impact.** *Geofísica Internacional*. 1, 49-64.
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). **Heavy metal toxicity and the environment.** *Experientia supplementum* 101, 133–164. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- Vicherová, E., Hájek, M., Hájek, T. (2015). **Calcium intolerance of fen mosses: Physiological evidence, effects of nutrient availability and successional drivers,** *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 17 (5), 347-359, ISSN 1433-8319, <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2015.06.005>.
- Violante, A, Cozzolino, V, Perelomov, L, Caporale, A.G, & Pigna, M. (2010). **Mobility and bioavailability of heavy metals and mecaulidioids in soil environments.** *Journal of soil science and plant nutrition* 10(3), 268-292. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162010000100005>
- Vodyanitskii, Y.N. (2016). **Standards for the contents of heavy metals in soils of some states,** *Annals of Agrarian Science* 14 (3), 257-263. ISSN 1512-1887, <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2016.08.011>.
- von Tucher, S., Hörndl, D., & Schmidhalter, U. (2018). **Interaction of soil pH and phosphorus efficacy: Long-term effects of P fertilizer and lime applications on wheat, barley, and sugar beet.** *Ambio*, 47(Suppl 1), 41–49. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-0970-2>
- Wu, X., Cobbina, S. J., Mao, G., Xu, H., Zhang, Z., & Yang, L. (2016). **A review of toxicity and mechanisms of individual and mixtures of heavy metals in the**

- environment.** *Environmental science and pollution research international*, 23(9), 8244–8259. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6333-x>
- Xiao Huayun, Congguo, Tang, Hongwei, Xiao, Yanli, Wang, Xueyan, Liu, and Congqiang, Liu. **Tissue S/N ratios and stable isotopes ($\delta^{34}\text{S}$ and $\delta^{15}\text{N}$) of epilithic mosses (*Haplocladium microphyllum*) for showing air pollution in urban cities in Southern China.** *United Kingdom*: N. p., 2010. Web. doi:10.1016/j.envpol.2009.11.016.
 - Xiao, H.Y., Li, N., Liu, CQ. (2015). **Source Identification of Sulfur in Uncultivated Surface Soils from Four Chinese Provinces**, *Pedosphere* 25 (1), 140-149, ISSN 1002-0160, [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(14\)60084-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(14)60084-9).
 - Xin Liu, Zhe Wang, Xiaoming Li, Weikai Bao, **Nitrogen and phosphorus translocation of forest floor mosses as affected by a pulse of these nutrients**, *Journal of Plant Ecology*, Volume 13, Issue 5, October 2020, Pages 633–640, <https://doi.org/10.1093/jpe/rtaa050>
 - Yushin, Nikita, Omari Chaligava, Inga Zinicovskaia, Konstantin Vergel, and Dmitrii Grozdov. (2020). **Mosses as Bioindicators of Heavy Metal Air Pollution in the Lockdown Period Adopted to Cope with the COVID-19 Pandemic.** *Atmosphere* 11, no. 11: 1194. <https://doi.org/10.3390/atmos11111194>
 - Zhang, M.K., Liu, Z.Y., Wang, H. (2010). **Use of Single Extraction Methods to Predict Bioavailability of Heavy Metals in Polluted Soils to Rice**, *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 41:7, 820-831, DOI: 10.1080/00103621003592341
 - Zhao, J., Zheng, Y., Zhang, B. et al. **Progress in the study of algae and mosses in biological soil crusts.** *Front. Biol. China* 4, 143–150 (2009). <https://doi.org/10.1007/s11515-008-0104-0>
 - González-Mendoza, D., & Zapata-Pérez, O. (2008). **Mecanismos de tolerancia a elementos potencialmente tóxicos en plantas.** *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (82), 53-61.
 - Arévalo, J. V. M. (2012). **Sucesión y restauración ecológica en las partes altas de cuencas y la provisión de agua.** *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21, 35-39.

Anexos

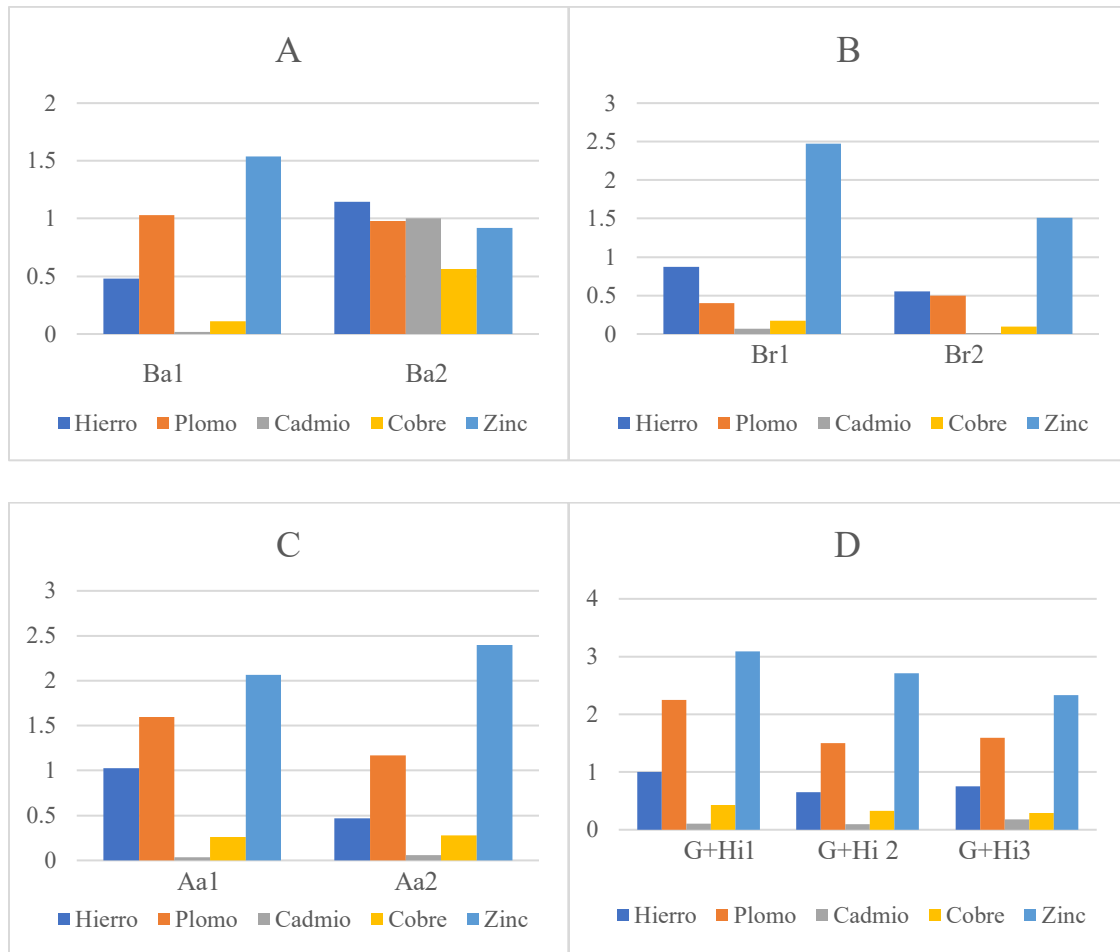


Figura 1A. Potencial de bioextracción por muestra de cada especie; A. *Bryum argenteum*, B. *Bryaceae*, C. *Anoetangium aestivum*, D. *Gymnostomum+ Hyophila involuta*

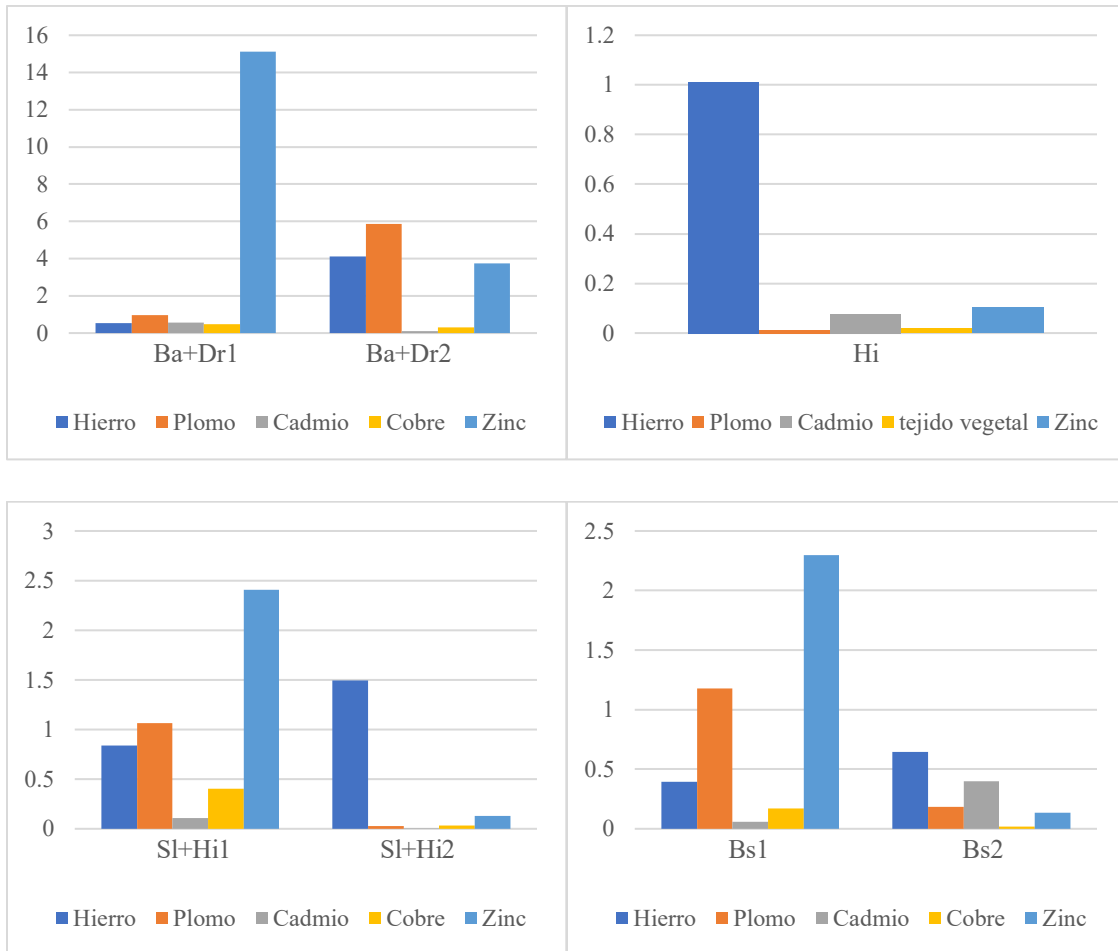


Figura 2A. Potencial de bioextracción por muestra de cada especie; *Bryum argenteum* + *Didymodon rigidulus*, *Hyophila involuta*, *Scopelophila lingulata* + *Hyophila involuta*, *Brachymerium systylium*