

Guía para la Conservación y Seguimiento de Ecosistemas Microbianos Extremófilos: Tapetes Microbianos, Microbialitos y Endoevaporitas

2017



Este documento ha sido elaborado por el Centro de Ecología Aplicada en el marco del proyecto “Análisis de Adaptación al Cambio Climático en Humedales Andinos”, código BIP N° 30126735-0, mandatado por la SEREMI de Medio Ambiente de Antofagasta y financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Regional de Antofagasta.

PROLOGO

Una de las tareas principales del Ministerio del Medio Ambiente es promover la gestión sustentable de los espacios naturales del país, asegurando la mantención de los ecosistemas dentro y fuera de las áreas protegidas y, con ello, la biodiversidad de manera integral. Con esto velamos no sólo por las especies carismáticas que habitan los espacios protegidos, entendido como algo ajeno, sino que aseguramos el bienestar de las personas. Nuestras actividades influyen directa e indirectamente sobre los ecosistemas, hacemos uso de los bienes y servicios que nos proveen, conocidos como los servicios ecosistémicos, por lo tanto, requerimos de su existencia y mantención en el largo plazo.

El Ministerio del Medio Ambiente en la Región de Antofagasta, en conjunto con el Centro de Ecología Aplicada, ha desarrollado este trabajo que viene a culminar lo que se origina en las demandas históricas de las Comunidades Indígenas, y entrega un producto que viene a traducir en un lenguaje cercano, los descubrimientos científicos en el territorio y su conservación y seguimiento. Los humedales altoandinos son ecosistemas frágiles, escasos y con un endemismo relevante. Han sido utilizados históricamente por los grupos humanos y desde hace varias décadas por sectores relevantes de la economía. Sin embargo, son pocos los que conocen su importancia y muchos menos los que han contemplado su belleza. Desde hace unos años, los grupos de interés han comprendido su relevancia y han surgido varias iniciativas público–privadas para apoyar su conservación. Pero debemos abordar de manera integral su estudio y manejo.

En este contexto, la Guía para la Conservación y Seguimiento de Ecosistemas Microbianos Extremófilos, los cuales se ubican en los humedales altoandinos es una herramienta que permitirá realzar el valor de estos sistemas y sus comunidades microbianas, las cuales destacan por potencialidades biotecnológicas sino que también al ser un registro viviente que nos permite conocer cómo era nuestro planeta hace 3.500 millones de años atrás.

Felipe Lorzundi Rivas
SEREMI de Medio Ambiente
Región de Antofagasta

Autores

- **Manuel Contreras L.** Licenciado en Ciencias Biológicas. Magister en Ciencias Biológicas, Doctor en Ecología. Universidad de Chile.
- **María Eugenia Farias.** Licenciada en Biología, Doctor en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Tucumán.

**Foto Portada: Laguna La Brava, Salar de Atacama, Región de Antofagasta. Autor: Diego Contreras.
Octubre de 2017**

Índice de Contenidos

1	Introducción.....	6
1.1	Objetivo de la Guía.....	6
2	Definiciones.....	7
3	Antecedentes generales de los EME.....	8
4	Aspectos funcionales de los ecosistemas extremófilos.....	11
5	Jerarquización de los humedales.....	13
6	Descripción de línea de base.....	15
7	Amenazas y vulnerabilidad.....	16
7.1	Extracción de agua.....	16
7.2	Disminución de carga iónica.....	16
7.3	Eutrofización del sistema.....	16
7.4	Contaminación cruzada.....	17
7.5	Disminución de transparencia del agua.....	17
7.6	Vulnerabilidad de los humedales.....	17
8	Plan de seguimiento ambiental.....	18
9	Mitigación.....	19
10	Estudios complementarios.....	21
11	Proyecciones de los EME.....	21
11.1	Turismo Científico.....	21
11.2	Aplicaciones Biotecnológicas.....	21
11.3	Bancos de metagenomas.....	22
12	Glosario.....	23
13	Referencias.....	26

1 Introducción

Los ambientes extremos son definidos como hábitats que experimentan una exposición estable o fluctuante a uno o más factores del entorno tales como, salinidad, desecación, radiación UV, presión barométrica, pH, temperatura. Los microorganismos que colonizan los ambientes extremos son llamados extremófilos, y este grupo incluye representantes de los tres dominios (Bacteria, Archaea, y Eukarya); éstos son categorizados dentro de subgrupos de acuerdo a características específicas de sus ambientes, esto es: psicrófilicos, termófilicos, halófilos, alcalófilos, acidófilos (Seufferheld y col., 2008).

Ejemplos típicos de ambientes extremos son las Lagunas de Altura de la Puna Andina (entre los 2.000 y 6.000 msnm), estos ecosistemas han demostrado ser una importante fuente de diversidad microbiana y de interesantes estrategias que permiten sobrevivir a los microorganismos bajo severas condiciones (Demergasso y col., 2008, Dorador y col 2010., Fernandez Zenoff y col., 2006; Zenoff y col., 2006; Dib y col., 2008; 2009 a,b; 2010; Ordoñez y col., 2009; Farías y col., 2009; Flores y col., 2009).

Los Ecosistemas Microbianos Extremófilos (EME) asociados a minerales son asociaciones de diatomeas, bacterias, cianobacterias, haloarqueas, hongos y protozoos, que influyen o inducen la precipitación de minerales, o se desarrollan asociados a los mismos en lagunas, fuentes hidrotermales, fumarolas de volcanes y salares de la Puna. Incluyen tapetes microbianos, microbialitos (estromatolitos, oncolitos y leiolitos), biopelículas y endoevaporitas.

1.1 Objetivo de la Guía.

En este documento se sintetiza el conocimiento que actualmente existe de los ecosistemas microbianos extremófilos (EME) localizados en cuencas endorreicas del norte de Chile, basados en investigaciones científicas realizadas en las regiones de Tarapacá y Atacama. Esta guía entrega conceptos básicos sobre la estructura y funcionamiento de los EME, mediante criterios que deben ser adoptados en el manejo y seguimiento ambiental, para asegurar su conservación.

2 Definiciones

Los EME pueden presentarse de diferentes formas: **Los biofilms** están formados por una película de microorganismos adheridos a una superficie que produce productos orgánicos incluyendo el exopolisacárido, puede precipitar sales y acumular por adhesión, sustratos inorgánicos como arena y polvo. Los **tapetes microbianos** son comunidades microbianas multilaminadas, multidimensionalmente reticulados que incorporan detritus, minerales y materiales geoquímicos asociados incluyendo cristales. Los **Microbialitos** son depósitos que se forman como resultado de comunidades bentónicas que atrapan sedimentos detríticos y/o forman núcleos de precipitación mineral. Son una estructura más compleja en la que se dividen las actividades metabólicas en forma estratificada en función de la disponibilidad de luz y O₂. La formación de microbialitos resulta de interacciones geoquímicas combinadas con litificación mediada por exopolímeros dominantes del tapete microbiano. De acuerdo con la forma en que precipitan los minerales los microbialitos pueden formar leiolitos, trombolitos o estromatolitos (Dupraz and Visscher 2005). Los **estromatolitos** son estructuras laminadas sedimentarias de origen biológico que se forman por la unión, atrapamiento y cementación de partículas sedimentarias y son producidas por lo general por organismos fotótrofos productores de tapetes microbianos. Son encontrados el registro biológico más antiguo y la evidencia más temprana de la vida sobre la tierra. Los estromatolitos primitivos representan el mayor componente del registro fósil durante miles de millones de años, apareciendo por primera vez hace 3.500 millones de años. En la era del Precámbrico, los ambientes primitivos de la Tierra eran muy hostiles para albergar vida como la que conocemos hoy en día y los estromatolitos pudieron dominar la superficie de la tierra sin competencia. Fueron los grandes generadores de O₂ a lo largo de millones de años transformando al planeta en un ambiente con O₂ (planeta azul) y creando la capa de ozono. Su abundancia disminuyó drásticamente en el Fanerozoico (542 millones de años atrás) como consecuencia de la aparición de los eucariotas. Hoy en día, todavía existen estromatolitos en la tierra, pero se encuentran casi extintos, pudiendo ser encontrados en algunas pocas localidades que suelen ser menos propicias para otras formas de vida, como ambientes hipersalinos, alcalinos generalmente asociados a mar y a ambientes cálidos. Por lo general existe una correlación entre su presencia y los ambientes donde no existen predadores de cianobacterias como caracoles u otro tipo de animales. Algunas de las localidades en donde pudieron ser encontrados estromatolitos vivos actuales son Shark Bay (Australia) y a lo largo del oeste de Australia, en las Bahamas

(por ejemplo Exuma Cays), en el océano Índico, en varios sitios en Estados Unidos (como es el caso del Parque Nacional Yellowstone), en Laguna Salgada (Brasil), en el desierto de México, en el Parque Nacional Glacier (Montana y Canadá), y en el Solar Lake en Sinaí. Las **evaporitas** son rocas sedimentarias que se forman por cristalización de sales disueltas en lagos y mares costeros. La mayoría de los depósitos explotables de yeso y sal común se han originado de esta manera. Cuando ocurre un proceso de evaporación y precipitación rápida en un ambiente polimíctico, predomina la precipitación de yeso como selenita (Babel 2004). Asociados a estos minerales habitan comunidades de microorganismos que se protegen de las condiciones adversas de los salares. La capacidad higroscópica que tiene el yeso y la capacidad de filtrar la radiación UV, crea un microambiente protegido del estrés osmótico variaciones de temperatura, altos niveles de radiación UV; lo que lleva a los microorganismos a buscar refugio a pocos milímetros debajo de la superficie de las rocas. La distribución de estas comunidades se da de la misma forma que en los tapetes y microbialitos: en forma estratificada de función del acceso a la luz y al O₂. Tal estilo de vida **endolítico**, ofrece suficiente cantidad de nutrientes, humedad y protección para la supervivencia (Stivalleta 2010).

3 Antecedentes generales de los EME

Recientemente, en la región Puna Chilena y Argentina (Figura 1), se han reportado distintos tipos de EME asociados a minerales (estromatolitos, microbialitos y evaporitas) en lagunas hipersalinas de la Puna (Demergasso y col., 2004, Farias y col., 2013, 2014, Rasuk y col., 2014, 2015, Farias y Contreras 2013). La importancia de este hallazgo se basa en que son los ecosistemas tipo microbialitos reportados a mayor altitud, desarrollándose en ambientes más parecidos a la tierra primitiva que hay en el planeta: la Puna.



Figura 1: Ecosistemas microbianos extremófilos en el altiplano. (A) sistemas evaporíticos habitados por extremófilos en Salar de Llamara. (B) Extremófilos habitando evaporitas de yeso en Salar de Llamara. (C) Corte de tapete microbiano en el Salar de Coposa. (D) Evaporitas habitadas por extremófilos en laguna Tebenquiche. (E) Tapetes microbianos en laguna Tebenquiche. (F) Microbialitos de carbonato de calcio en laguna La Brava. (G) Evaporitas habitadas por extremófilos en laguna Cejar.

El desierto de Atacama (Chile), es el más árido del planeta. Presenta una superficie que ha sido modulada por la erosión natural a lo largo de millones de años. Las cuencas de drenaje endorreico, contienen salares en su interior (Risacher y col. 2003), formando presencia de lagos someros salinos e hipersalinos donde predomina la precipitación de minerales ricos en sulfatos, cloruros y boratos (López-López y col. 2010). En estos ambientes extremos han sido reportados una gran diversidad de EME, que incluyeron tapetes microbianos de halita, aragonita o yeso, microbialitos de carbonato de calcio y domos de evaporitas de yeso formando endoevaporitas (Figura 2, Demergasso y col. 2004, Lara y col., 2012, Farias y Contreras 2013, Farias y col. 2014, Rasuk y col. 2014, Rasuk y col 2015).

La laguna Tebenquiche y La Brava se encuentran ubicadas en los extremos Norte y Sur del Salar de Atacama respectivamente (Farias y col 2014). En ambas lagunas se observa un gradiente de salinidad que comprende la formación de tapetes microbianos de carbonato de calcio, halita y yeso y continúa con tapetes litificados formando microbialitos de carbonato en La Brava y domos de evaporitas de yeso habitados por endoevaporitas en Tebenquiche. Cabe recordar que la diferencia entre ambos sistemas litificados (microbialitos y evaporitas) es que, en los microbialitos, existe una inducción de las comunidades microbiana en la precipitación del mineral que generalmente es carbonato de calcio (Dupraz y col 2009), mientras que, en los domos de evaporitas habitados por endoevaporitas, la génesis es principalmente por evaporación y precipitación química (Figura 2). La posible influencia de los microorganismos en la formación de los domos no está bien establecida como en los microbialitos y es tema de una amplia discusión (Babel 2014, Farias y col. 2014). Con ese fin, se están llevando a cabo estudios comparativos de diversidad, geoquímica y metagenómica de estos ecosistemas (tapetes microbialitos y domos de yeso; Farias y col 2014), para entender los mecanismos involucrados en la génesis de estos sistemas modernos y así poder extrapolarlos a registros fósiles en todo el planeta.

Sistemas similares han sido reportado en los Puquíos del Salar de Llamara, los cuales corresponden a evaporitas de yeso, habitados por una compleja comunidad de microorganismos que se distribuyen en forma similar a los tapetes microbianos (Demergasso y col., 2004, Rasuk y col., 2014).

4 Aspectos funcionales de los ecosistemas extremófilos

Los EME asociados a minerales son sistemas prácticamente cerrados, que incluyen en unos pocos milímetros, los ciclos geoquímicos más importantes del planeta. Por lo tanto, lo único que necesitan, es agua y luz y condiciones extremas que reduzcan la competencia con organismos eucariotas. Estudios metagenómicos de estos ecosistemas demostraron que los ciclos geoquímicos serían muy ancestrales, previos a la atmósfera oxigénica en el planeta. De esta forma la fijación de Carbono sería alternativa a la fotosíntesis primitiva como la Reductora de Acetil CoA, 3-Hidroxipropionato o la del Hidroxibutirato. Por otro lado, la respiración de Arsénico sería un sistema ampliamente distribuido (Rasuk y col 2014, 2015, Farias y col 2014, Díaz-Palma y col. 2013).

Los ciclos geoquímicos descritos en los EME de los ecosistemas de Atacama, serían una especie de eslabón perdido de la geoquímica que existió en el planeta antes de que la liberación de O₂ producida por la fotosíntesis. Los EME asociados a minerales serían la base de la producción primaria en los humedales, producción que sostiene una importante diversidad de invertebrados y aves, entre estas últimas especies emblemáticas como los flamencos.

En este contexto, el estudio y conservación de estos ecosistemas microbianos extremófilos es de vital importancia no solo desde el punto de vista científico, sino también para conservar la salud integral de los humedales altoandinos.



Figura 2: Tipos de EME encontrados en el desierto de Atacama. (A,B,C,D) Tapetes microbianos. (E) Comparación de evaporita de selenita y tapetes microbianos. (F) Microbialitos de carbonato sumergidos. (G) Tapete microbiano con precipitación de selenita y halita en zonas más salinas. (H) Evaporitas de yeso. (I) Microbialitos de carbonatos formando plataformas expuestas al aire (Tomado de Farías y col. 2014).

5 Jerarquización de los humedales

A partir del descubrimiento de los estromatolitos del Socompa a 3.600 msnm en el año 2009, se continuaron reportando Ecosistemas microbianas extremófilos minerales (EME) a ambos lados de la cordillera Argentino-Chilena. Sin embargo, no todos los humedales andinos presentan este tipo de ecosistemas, no se sabe en detalle qué factores físicos-químicos ambientales son los determinantes para que en una laguna se desarrollen EME y en otras no. Es así como podemos encontrar humedales sin presencia de estos microorganismos (laguna Lejía), o bien, humedales con tapetes multilaminares, microbialitos, fitomicrobialitos y oncolitos (Laguna Brava). En base a observaciones de campo, es posible señalar que los EME estarían asociados al aporte de aguas hidrotermales cercanas a volcanes activos y/o afloramientos de aguas hipersalinas.

En esta guía se propone una jerarquización de humedales en base al tipo y números de EME presentes en cada humedal. Esta jerarquización establece un gradiente de menor a mayor complejidad, basado el número y tipo de EME presentes. El valor ambiental de estos humedales está directamente relacionado con el nivel de complejidad. A continuación se describen las diferentes categorías propuestas :

CATEGORIA 0: no presenta EME (laguna Lejía). Los microorganismos presentes en los ecosistemas acuáticos no estructurados espacialmente.

CATEGORIA I: presenta 1 clase de EME. El tapete microbiano es la forma más común de EME, sin embargo, los tapetes microbianos pueden presentar distintos niveles de complejidad, según la cantidad de capas que presenten. De estas formas se pueden encontrar tapetes de dos o más capas, de acuerdo a esta complejidad se los clasifica en A, B o C.

A: 1 ó 2 capas (Salar Grande)

B: hasta 3 capas (Salar de Coposa, Tara)

C: multilaminar (Salar de Punta Negra, Laguna Brava, Laguna Tebenquiche)

CATEGORIA II: presenta 2 clases de EME. Incluye un nivel más complejo de tapetes microbianos de tipo C, los que pueden ir acompañados de litificaciones de carbonato de calcio que forman microbialitos o precipitaciones de sulfato de calcio que forman evaporitas.

CATEGORIA III: presenta 3 o más clases de EME. En esta categoría se pueden encontrar ecosistemas muy complejos que presentan tapetes microbianos, microbialitos o evaporitas, fitomicrobialitos y hasta otra clase de microbialitos como oncolitos. Ejemplos de estos ecosistemas más complejos son Laguna Brava (tapetes, microbialitos sumergidos y expuestos, oncolitos y fitomicrobialitos) y Tebenquiche (tapetes, evaporitas-endoevaporitas sumergidas y expuestas y fitomicrobialitos). Estos ecosistemas son los que requieren un mayor nivel de protección y cuidado, ya que las condiciones ambientales que fomentan tal diversidad de EME pueden ser más complejas y por lo mismo más vulnerables a cambios.

En la Tabla 5-1 se presentan los resultados de humedales en orden de importancia, en base a los tipos de EME presentes en el ecosistema.

Tabla 5-1: Humedales con diferentes tipo de EME.

Humedal	Categoría	Tipo de EME					
		Evaporita	Microbialito	Fitomicrobialito	Tapetes		
					A	B	C
La Brava	III-C	NO	SI	SI	NO	NO	SI
Tebenquiche	III-C	SI	NO	SI	NO	NO	SI
Cejar	II-C	SI	NO	SI	NO	NO	SI
LLamara	II-C	SI	NO	NO	NO	NO	SI
Punta Negra	I-C	NO	NO	NO	NO	NO	SI
Tara	I-B	NO	NO	NO	NO	SI	NO
Ascotan	I-A	NO	NO	NO	SI	NO	NO
Pucsa	0	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Lejía	0	NO	NO	NO	NO	NO	NO

6 Descripción de línea de base

A partir de los antecedentes aportados por diferentes estudios científicos (Farias y Contreras 2013, Farias y col. 2013, Farias y col. 2014, Rasuk y col 2014, Stivaletta 2010), se proponen parámetros para describir el estado ecológico de los EME, considerando diferente nivel de detalle.

Nivel 1: Humedal natural

- Parámetros físicos y químicos: nivel de agua, sólidos en suspensión, conductividad, potencial redox, temperatura, pH.
- EME: determinar presencia y distribución de tapetes, microbialitos, endo-evaporitas, fitotomicrobialitos, biofilm. Presencia de pigmentos de clorofila a y fucoxantina capa superior (capa verde), bacterioclorofilas (capas inferiores).
- Mineralogía: determinar la presencia de carbonatos (aragonita, calcita o micrita), sulfatos (yeso, ternadita etc) halitas, aylusita.

Nivel 2: Humedal con presiones de origen antrópico

Considera los parámetros de Nivel 1 y los que se detallan a continuación:

- Parámetros físicos y químicos del agua: aniones y cationes, metales.
- EME: diversidad microbiana de los 2 -3 cm superiores.

Nivel 3: Humedal con elevada Rriqueza de EME

Considera los parámetros de Nivel 1 y 2, además de los que se detallan a continuación:

- Parámetros físicos y químicos del agua: determinación origen del agua con isotopos estables y perfiles de producción de O₂, HS⁻ con microelectrodos.
- EME: diversidad microbiana en las 3 primeras capas y determinación de metabolismos claves en metagenomas.

7 Amenazas y vulnerabilidad

A continuación se describen las principales amenazas que pueden alterar estos ecosistemas:

7.1 Extracción de agua

La desecación del humedal conlleva un cambio drástico en su estado ecológico, sin embargo, los EME poseen una extraordinaria resistencia a la alternancia entre procesos de desecación e inundación, por lo que es posible esperar que frente a un evento de desecación las comunidades puedan recuperarse. Los márgenes de tiempo en los cuales los EME serían capaz de recuperarse, deberían ser establecidos mediante estudios de resiliencia.

7.2 Disminución de carga iónica

Una disminución de la carga iónica del ecosistema, por efectos de recarga hídrica artificial y/o disminución de los aportes hipersalinos, puede producir la disolución de los minerales de halita y yeso que estructuran los EME y evaporitas. Incluso puede favorecer la colonización de biota menos extrema que competiría y desplazaría la microbiota extremófila. Si el sistema se secura por efectos antrópicos, su recuperación debería llevarse cabo con aguas que tengan las mismas características que las aguas originales.

7.3 Eutrofización del sistema

Aporte de aguas servidas o materia orgánica, así como el uso de las aguas para recreación (ej. baño), se traducen en un aporte adicional de nutrientes (ej. amonio, piel), que pueden modificar el metabolismo global del ecosistema, desde heterotrófico a autotrófico, modificando la fuente de energía hacia uno controlado por carbono orgánico. Lo anterior probablemente llevaría a la extinción del ecosistema extremófilo.

7.4 Contaminación cruzada

Las actividades turísticas, científicas, programas de monitoreo, entre otras, pueden producir contaminación biológica cruzada desplazando la diversidad original de un sitio a otro, ya que se ha podido comprobar que estos ecosistemas presentan particularidades a nivel de cada cuerpo de agua. Por lo cual es muy importante que quienes realizan estas actividades, tengan la precaución de lavar botas y materiales que introducen en el agua, así como también sería recomendable el lavado de las ruedas de vehículos.

7.5 Disminución de transparencia del agua

Como se menciona anteriormente, estos sistemas dependen de la luz, el enturbiamiento del agua filtra la luz y altera el sistema. Este enturbiamiento puede ser por eutrofización o aumento de sólidos en suspensión provenientes de remoción y transporte por el viento o agua de sedimentos en zonas aledañas.

7.6 Vulnerabilidad de los humedales

En la Tabla 7-1 se presenta el grado de vulnerabilidad que tiene cada categoría de humedal, considerando que es proporcional a la complejidad inherente a cada ecosistema.

Tabla 7-1: Grado de vulnerabilidad de los humedales de acuerdo al grado de complejidad.

Categorías	Vulnerabilidad (1)		
	Recurso hídrico (2)	Calidad agua (3)	Trofia (4)
I	baja	media	alta
II	alta	alta	alta
III	alta	alta	alta

(1) Vulnerabilidad: baja, media, alta
(2) Recurso hídrico: disminución nivel lagunas sin desecación
(3) Calidad de agua: cambio composición iónica
(4) Trofia: aumento aporte materia orgánica o nutrientes

8 Plan de seguimiento ambiental

El desarrollo de un monitoreo y seguimiento ambiental para un determinado humedal, tiene como objetivo principal la detección temprana de las desviaciones en la estructura y funcionamiento del ecosistema que podrían ocurrir debido a la existencia de perturbaciones de origen antrópico (amenazas). Esta actividad permitirá “reconocer cambios en las condiciones ecológicas de un humedal durante un determinado período de tiempo, a través de un proceso de medición, predicción y evaluación” (MMA, SAG. DGA. 2011).

Para el diseño de un programa de monitoreo se deben considerar los siguientes aspectos básicos: variable(s) de estado, control espacio-temporal coherente de la(s) variable (s) de estado y actividades antrópicas que ejercen presión sobre los humedales. En la Tabla 8-1 se indican variables de estado específicas para los EME, su relación con diferentes actividades de origen antrópico y indicadores de cambio ecológico.

El plan de seguimiento ambiental debería considerar al menos 2 estaciones contraopuestas (verano e invierno).

Tabla 8-1: Variables de estado, actividades antrópicas y indicadores de cambio.

Variables de estado	Actividades antrópicas	Indicador de cambio
Nivel de agua	Disminución de los niveles de agua superficial y/o subterránea por extracción artificial de agua.	Disminución mayor al patrón estacional determinado en la línea de base.
Salinidad	Disminución recarga hídrica por extracción artificial de agua.	Aumento mayor al patrón estacional determinado en la línea de base.
Clorofila	Aporte de agua dulce. Aporte de materia orgánica.	Aumento mayor al patrón estacional determinado en la línea de base.
Presencia de domos	Aporte de agua dulce.	Disolución de los domos por disminución de la salinidad .
Estratificación de colores característicos (estrato rosa - verde - púrpura y negro)	Aporte de agua dulce. Salinización del sistema. Aumento turbidez del agua . Eutrofización.	Pérdida de estratificación coloreada del sistema, siendo un indicador directo de cambio en las condiciones físico-químicas que mantienen la diversidad microbiana.

VARIABLES DE ESTADO	ACTIVIDADES ANTRÓPICAS	INDICADOR DE CAMBIO
Transparencia del agua	Eutrofización por disminución de salinidad. Eutrofización aporte de materia orgánica. Aporte de sedimentos por remoción de sustrato (natural o artificial).	Disminución de transparencia mayor al patrón estacional determinado en la línea de base.
Componentes principales de la diversidad	Eutrofización. Desecamiento. Disminución de la salinidad.	Disminución de biodiversidad y/o organismos halófilos característicos (Archeas, Bacteroidetes, etc), respecto al patrón estacional determinado en la línea de base. Aumento en dominancia de organismos normales (no tolerantes a la sal), respecto al patrón estacional determinado en la línea de base.
Clorofila a, fucoxantina y bacterioclorofilas en las capas	Eutrofización.	Desaparición de uno (s) de los pigmentos (estratos de colores) o la proporción establecida entre ellos, respecto al patrón estacional determinado en la línea de base.
Presencia de enzimas de ciclos geoquímicos claves	Eutrofización. Disminución de la carga iónica.	Desaparición de la expresión o presencia de las enzimas marcadoras establecidas en base a estudios metagenómicos de línea de base.
Perfiles de O ₂ y SH ₂	Variación de la diversidad.	Desaparición de perfiles de producción de O ₂ o SH ₂ , o su alteración, respecto al patrón estacional determinado en la línea de base.

9 Mitigación

Frente a cambios en las variables de estado que superen el patrón estacional determinado en la línea de base, es necesario implementar medidas de mitigación para reducir los potenciales impactos estructurales y funcionales sobre los EME (Tabla 9:1).

Tabla 9-1: Medidas de mitigación

Variables de estado	Mitigación
Variación en el nivel de agua (*)	Incorporar agua de las mismas características físico-químicas registradas en la línea de base. Disminuir la extracción artificial de agua y/o salmuera.
Variación en la salinidad (*)	Frente a un aumento de la salinidad, disminuir la extracción artificial de agua superficial y/o subterránea. Incorporar agua de las mismas características físico-químicas. Frente a una disminución de la salinidad, disminuir la extracción artificial de salmuera.
Variación en Clorofila y otros pigmentos, como la fucoxantina (diatomeas) y las bacterioclorofilas	Incorporar agua de las mismas características físico-químicas registradas en la línea de base. Regular el aporte artificial de agua, si fuera el caso. Controlar aporte de materia orgánica alóctona.
Disolución de domos	Dejar de incorporar agua dulce artificialmente si fuera el caso y/o disminuir la extracción artificial de salmuera.
Variación en estratificación con colores característicos (estrato rosa - verde - purpura y negro)	Reestablecer niveles y salinidad del agua. Controlar aporte materia orgánica. Controlar incorporación de sedimentos.
Transparencia del agua	Reducir el aporte de sedimentos alóctonos y/o materia orgánica.
Biodiversidad	Reducir o eliminar el aporte de materia orgánica o sedimentos de origen exógenos.
Clorofilas y bacterioclorofilas en el estrato	
Presencia de enzimas de ciclos geoquímicos claves	
Perfiles de O ₂ y SH	

(*) Los rangos máximos y mínimos de variación de salinidad y niveles de agua deben ser establecidos en estudios de curvas de habitabilidad.

10 Estudios complementarios

Para evaluar la respuesta de los EME a cambios en las condiciones ambientales y/o amenazas de origen antrópico, es necesario realizar estudios de curvas de habitabilidad dirigidas a establecer firmas microbiológicas específicas para cada ecosistema. Las curvas de habitabilidad permitirán establecer los rangos normales en los cuales se desarrollan los EME y su capacidad absorber perturbaciones y/o recuperarse (ej. desecación, desalinización, disminución transparencia del agua).

11 Proyecciones de los EME

Los EME tienen un elevado interés científico y ambiental, como parte constituyente de ecosistemas extremos y componente basal que mantiene energéticamente las poblaciones de flamencos en los salares. No obstante, los EME tienen otras implicancias que se detallan a continuación:

11.1 Turismo Científico

Las zonas donde se encuentran los principales EME reportados (Salar de Atacama y Llamara) tiene una gran afluencia turística, lo que constituye una gran oportunidad para incorporar la ciencia, la divulgación científica, la conservación del medio ambiente, la educación ambiental y el desarrollo turístico en un círculo virtuoso, dándole valor agregado al patrimonio natural. Para eso se propone integrar estos estudios al turismo científico dando lugar a proyectos tales como: “*La Ruta del Origen de la Vida*”. Para esto es necesaria la divulgación y la formación de recursos humanos.

11.2 Aplicaciones Biotecnológicas

Los sistemas extremófilos son de gran interés en aplicaciones biotecnológicas en el área de biocombustibles, industria farmacéutica y cosmética, biominería y biorremediación, entre otros. Esta área de Investigación-Desarrollo-Innovación (I+D+I), requiere ser analizada en detalle como un recurso estratégico a nivel país.

11.3 Bancos de metagenomas

A medida que avanzan los estudios de metagenomas en los EME, los primeros indicios indican que estos ecosistemas poseen ciclos geoquímicos nuevos para la ciencia. Lo anterior plantea la necesidad de crear colecciones de muestras de EME asociados a minerales y sus respectivos metagenomas, para resguardar este patrimonio de gran interés científico y biotecnológico.

12 Glosario

ADN: Acido Desoxirribonucleico, proteína compleja que se encuentra en el núcleo de las células y es responsable de contener toda la información genética de un ser vivo.

Atmósfera: Capa gaseosa que envuelve el planeta, de aproximadamente 10.000 km de espesor, compuesta de diversos gases, entre ellos oxígeno (O₂), hidrógeno (H₂), nitrógeno (N₂) y otros. En ella se producen todos los fenómenos climáticos y meteorológicos que afectan el planeta.

Atmósfera oxidante: Una atmósfera oxidante es una atmósfera que contiene oxígeno libre (O₂) y en la que hay otros compuestos en un estado oxidado.

Atmósfera reductora: Es una atmósfera sin cantidades significativas de oxígeno libre (O₂) y otros gases o vapores oxidantes, evitando de este modo la oxidación. Presenta cantidades importantes de compuestos con hidrógeno (H) como amonio o metano, capaces de reducir otras moléculas.

Capa de ozono: zona de la atmósfera, denominada estratósfera, que contiene una concentración relativamente alta de ozono (O₃). Esta capa se ubica entre los 15 y los 50 km de altitud. Una de sus funciones conocidas es que absorbe entre el 97 y 99% de la radiación UV proveniente del espacio.

Carbonato de Calcio: Compuesto químico, de fórmula CaCO₃, o carbonato de calcio Este compuesto mineral está presente mayoritariamente en el mineral denominado Calcita la que se forma por cristalización directa de disoluciones diluidas.

Cianobacterias: Bacterias capaces de realizar fotosíntesis oxigénica. También se les denomina oxifotobacterias.

Clorofila: Compuesto orgánico, formado por moléculas que contienen átomos de carbono, hidrógeno, nitrógeno y magnesio, fundamental para el proceso de fotosíntesis.

Cuenca endorreica: Cuenca cerrada que retiene el agua en su interior, no permitiendo su salida a otros cuerpos de agua vecinos (ríos u océanos), aunque convergiendo en lagos interiores o pantanos, permanentes o estacionales, que se equilibran en su tamaño por la evaporación directa del agua.

Evaporación: Proceso físico que corresponde al paso de una sustancia desde el estado líquido al gaseoso.

Evapotranspiración: Corresponde al agua que vuelve a la atmósfera luego de ser evaporada desde una superficie de suelo y transpirada por las plantas que crecen sobre ella.

Exopolisacárido: Polímero orgánico (hidrato de carbono) que está compuesto por una extensa sucesión de monosacáridos, unidos entre sí mediante enlaces glucosídicos. Se caracteriza por manifestarse en forma de capa exterior de las paredes de las células de las bacterias formando un limo.

Extremófilos: Organismo, frecuentemente un microorganismo, que vive en condiciones ambientales extremas.

Fotosíntesis: Proceso fotoquímico, en virtud del cual los organismos con clorofila, capturan energía en forma de luz y la transforman en energía química, liberando O₂ en el proceso.

Humedales: Según Ramsar, corresponde a las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”.

Litósfera: Capa exterior de la tierra, de profundidad que fluctúa entre los 10 y los 50 km, constituida principalmente por silicatos, e integrada por la corteza y parte del manto.

Magma: Masa de rocas fundidas que se encuentra en las capas profundas de la Tierra a muy elevada temperatura y presión, la cual emerge a la superficie mediante un volcán.

Manto: Capa de rocas situada bajo la corteza terrestre que la separa del núcleo del planeta.

Nanómetro: Corresponde a la milmillonésima parte de un metro (1×10^{-9} m). Se designa como nm.

Ozono: Forma alotrópica del oxígeno (que posee diferente estructura), estable en ciertas condiciones de presión y temperatura. Es un gas compuesto por tres átomos de oxígeno.

Período Cámbrico: Primer período de la era Paleozoica, que abarca desde los 542 a los 488 millones de años atrás. Este período produjo el estallido de vida más intenso sobre la tierra, en términos de diversidad.

Puna Andina: Término derivado del quechua usado para denominar el terreno elevado, o meseta altiplánica que se caracteriza por tener un clima frío, con gran oscilación térmica entre el día y la noche, bajo nivel de precipitaciones, poco nivel de oxígeno en el aire por la altura, y una presión atmosférica baja.

Radiación UV: Corresponde a un tipo de energía emitida por el sol y que forma parte del espectro de luz. La radiación UV-A corresponde a aquella comprendida entre los 320 y 400 nanómetros y la radiación UV-B, cuya longitud de onda fluctúa entre los 280 y 320 nanómetros.

Ramsar: Tratado intergubernamental sobre conservación y uso sostenible de los recursos naturales. Su nombre oficial como tratado es Convención relativa a los Humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas.

Salar: Un Salar es un lago superficial, asociado normalmente a una cuenca endorreica, en cuyos sedimentos dominan las sales (cloruros, sulfatos, nitratos, boratos, etc.). Las sales precipitan por la fuerte evaporación, que a largo plazo siempre es mayor que la alimentación o entrada de las aguas en la cuenca.

Vegetación halófila: Vegetación característica de suelos salinos que tiene como característica que toleran diferentes grados de salinidad en el suelo. Se encuentra frecuentemente en zonas costeras bajas, y en lagunas saladas interiores.

13 Referencias

Babel M (2004) Models for evaporite, selenite and gypsum microbialite deposition in ancient saline basins. *Acta Geol Pol* 54:219 – 249.

Demergasso C, Chong G, Galleguillos P, Escudero L, Martínez-Alonso M, Esteve I (2003) Microbial mats from the Lllamará salt flat, northern Chile. *Rev Chil Hist Nat* 76 (3):485-499.

Demergasso, C., Escudero L., Casamayor E. O., Chong, G., Balague V., Pedro's-Alío, C. (2008) Novelty and spatio-temporal heterogeneity in the bacterial diversity of hypersaline Lake Tebenquiche (Salar de Atacama) *Extremophiles* 12:491–504.

Demergasso C, Casamayor EO, Chong G, Galleguillos P, Escudero L, Pedros-Alío C (2004) Distribution of prokaryotic genetic diversity in athalassohaline lakes of the Atacama Desert, Northern Chile. *FEMS microbiology ecology* 48: 57-69.

Díaz-Palma P, Alfaro G, Hengst M, Pozo P, Stegen S, Queirolo F, Rojo G, Silva P, Arias D, Gallardo K, and Contreras-Ortega C. "Kinetics of arsenite removal by halobacteria from a highland Andean Chilean Salar." *Aquatic biosystems* 9.1 (2013): 8.

Dib J, Fenandez V, Motok J, Ordoñez O, Farías ME. 2008 Occurrence of resistance to antibiotics, UV-B and arsenic in bacteria isolated from extreme environment in high altitude Andean wetlands (4,560 m and 4,400 m altitude) *Current Microbiology* 56:510-7.

Dib J, Weiss A, Neumann A, Ordoñez O, Estévez M, Farías ME. 2009 (a). Isolation of bacteria from remote high altitude Andean wetlands able to grow in the presence of antibiotics. *Recent Patents on Anti-Infective Drug Discovery* 4(1):66-76.

Dib J, Weiss A, Neumann A, Ordoñez O, Estévez M, Farías. 2009 (c). Isolation of bacteria from remote high altitude Andean wetlands able to grow in the presence of antibiotics. *Recent Patents on Anti-Infective Drug Discovery* 4(1):66-76.

Dib J, Wagenknecht M, Russe Hill, Farías ME, F Meinhard F. 2010. Novel linear megaplasmid from *Brevibacterium* sp. Isolated from extreme environment. *Journal of Basic Microbiology* 50(3):280-4.

Dorador C, Vila I, Remonsellez F, Imhoff JF, Witzel KP (2010) Unique clusters of Archaea in Salar de Huasco, an athalassohaline evaporitic basin of the Chilean Altiplano. *FEMS microbiology ecology* 73: 291-302.

Dupraz C, Reid RP, Braissant O, Decho AW, Norman RS, Visscher PT (2009) Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth-Science Rev* 96:141–162. doi: 10.1016/j.earscirev.2008.10.005.

Dupraz C, Visscher PT (2005) Microbial lithification in marine stromatolites and hypersaline mats. *Trends Microbiol* 13:429–438. doi: 10.1016/j.tim.2005.07.00.

Farías ME, Contreras M, Rasuk MC, Kurth D, Flores MR, Poiré DG, Novoa F, Visscher PT (2014) Characterization of bacterial diversity associated with microbial mats, gypsum evaporites and carbonate microbialites in thalassic wetlands: Tebenquiche and La Brava, Salar de Atacama, Chile. *Extremophiles* 18:301-329.

Farías ME, Contreras M (2013) Ecosistemas Microbianos. ¿Nuevo patrimonio de la Humanidad? *Revista Bitacora Ecológica* 1 (Chile).

Farías ME, Fernández-Zenoff V, Flores R, Ordoñez O, Estévez C (2009) Impact of solar radiation on bacterioplankton in Laguna Vilama, a hypersaline Andean lake (4650 m). *J Geophys Res* 114:G00D04. doi: 10.1029/2008JG000784.

Fernández Zenoff V, Siñeriz F, Farías ME (2006) Diverse responses to UV-B radiation and repair mechanisms of bacteria isolated from high-altitude aquatic environments. *Appl Environ Microbiol* 72:7857–63. doi: 10.1128/AEM.01333-06.

Fernández Zenoff V, Heredia J, Ferrero M, Siñeriz F, Farías ME (2006) Diverse UV-B resistance of culturable bacterial community from high-altitude wetland water. *Curr Microbiol* 52:359–62. doi: 10.1007/s00284-005-0241-5.

Flores MR, Ordoñez OF, Maldonado MJ, Farías ME (2009) Isolation of UV-B resistant bacteria from two high altitude Andean lakes (4,400 m) with saline and non saline conditions. *J Gen Appl Microbiol* 55:447–58.

Lara J, González LE, Ferrero M, Díaz GC, Pedrós-Alió C, Demergasso C (2012) Enrichment of arsenic transforming and resistant heterotrophic bacteria from sediments of two salt lakes in Northern Chile. *Extremophiles* 16:523-538.

López-López A, Yarza P, Richter M, Suárez-Suárez A, Antón J, Niemann H, Rosselló-Móra R (2010). Extremely halophilic microbial communities in anaerobic sediments from a solar saltern. *Environ Microbiol Rep* 2 (2):258-271.

MMA, SAG, DGA. 2011. Guía para la conservación y seguimiento ambiental de humedales Andinos. Santiago. Chile. 47 pp.

Ordoñez OF, Flores MR, Dib JR, Paz A, Farías ME (2009) Extremophile culture collection from Andean lakes: extreme pristine environments that host a wide diversity of microorganisms with tolerance to UV radiation. *Microb Ecol* 58:461–73. doi: 10.1007/s00248-009-9527-7.

Rasuk, Cecilia, Daniel Kurth, Maria, Regina Flores, Javier Maldonado, Manuel Contreras, Fernando Novoa, Daniel Poire and Maria Eugenia Farias (2014). Microbial characterization of a gypsum endoevaporitic ecosystem in Salar de Llamara. *Microbial Ecology* 10.1007/s00248-014-0431-4.

Rasuk, Maria Cecilia Daniel Kurth, Regina Flores, Manuel Contreras, Fernando Novoa, Daniel Poire and Maria Eugenia Farias (2015). Bacterial diversity in microbial mats and sediments from Atacama Desert *Microbial Ecology* MECO-D-15-00034 en prensa.

Risacher, F, Alonso H, Salazar C. 2003. The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. *Earth-Science Reviews* 63 (3-4): 249-293.

Seufferheld, Manfredo J. Héctor M. Alvarez and Maria E. Farias. 2008 Polyphosphates as Microbial Modulators of Environmental Stress Minireview *Applied and Environmental Microbiology*.74:5867–5874. Cover caption <http://aem.asm.org/content/vol74/issue22/index.dtl>.

Stivaletta N, Barbieri R, Cevenini F, Lopez-Garcia P. 2011. Physicochemical conditions and microbial diversity associated with the evaporite deposits in the Laguna de la Piedra (Salar de Atacama, Chile). *Geomicrobiol J* 28 (1):83-95.

ANEXO I

Identificación de comunidades microbianas en base a las líneas de coloración de los EME asociados a minerales (tapetes, microbialitos y endoevaporitas).

Una de las características distintivas de estos ecosistemas es la presencia de estratos multicolores que se pueden observar cuando se hace un corte transversal del sistemas (tapetes, microbialitos y endoevaporitas). Esta estratificación puede tener varias capas o estratos que pueden extenderse por varios centímetros debajo de la superficie (Figura Anexo-1).

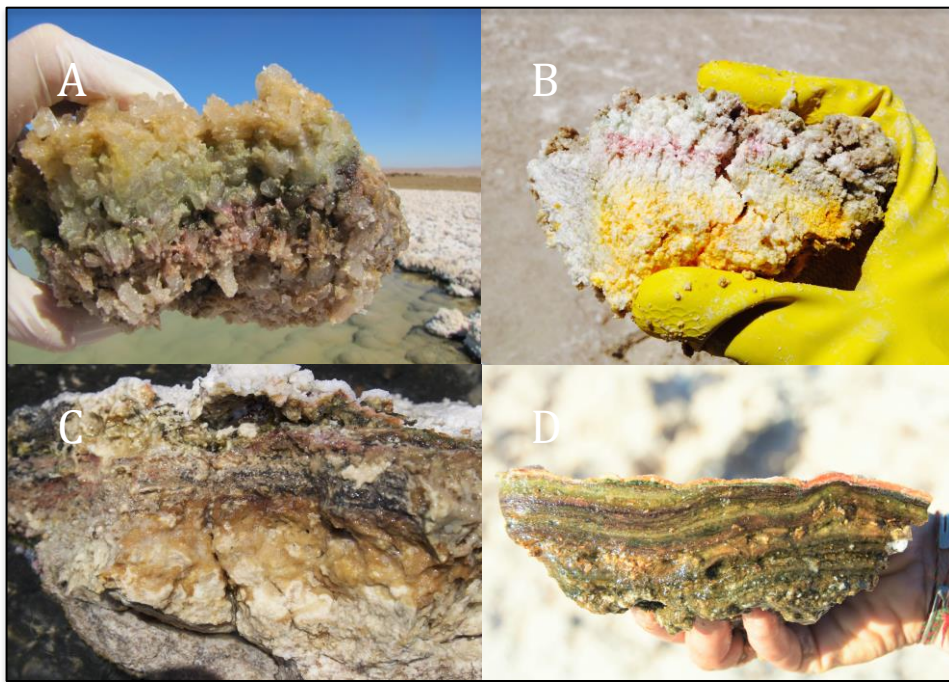


Figura Anexo-1: Ejemplos de estratificación de EME. (A) Evaporitas del Salar de Llamara. (B) Microbialito de carbonato de calcio de laguna La Brava. (C) Tapete microbiano de 3 capas del salar de Tara. (D) Tepete multilaminar de laguna Tebenquiche.

Composición microbiana en cada capa

En este anexo se presenta una orientación general de los nichos ecológicos que ocupan los microorganismos de cada capa (Tabla Anexo-1):

Capa 1: esta capa superior puede presentar un color amarillo o rosado, se depositan minerales que pueden ser sulfatos o carbonatos con depósitos de halita. Los microorganismos asociados a esta capa superior suelen ser muy resistentes a radiación UV y son heterótrofos (ej. *Deinococcus*, *Bacteroidetes*).

Capa 2: esta capa suele ser de color verde y como llega suficiente luz y O_2 , puede estar habitada por microorganismos capaces de realizar la fotosíntesis (ej. cianobacterias), las cuales se protegen de la luz UV por la capa 1.

Capa 3: esta capa es de color púrpura o rosada, ya que a este estrato no llega el O_2 y los microorganismos que lo habitan realizan fotosíntesis usando en H_2S en vez del O_2 (ej. bacterias purpuras, verdes sulfurosas y no sulfurosas)

Capa 4: las capas inferiores pueden ser de color oscuro, ya que albergan microorganismos que realizan fermentación y/o sulfatoreductores.

Es importante señalar que la composición biológica de las diferentes capas es preliminar, ya que debe ser definida específicamente para cada EME. A modo de ejemplo podemos señalar que exploraciones realizadas en la laguna La Brava reportaron Arqueas (*Euryarchaeotas* y *Chrenarchaeotas*), en cambio, en la laguna Tebenquiche se encontraron principalmente cianobacterias, prácticamente ausentes por en la laguna La Brava.

Tabla Anexo-1: Descripción líneas de coloración y composición de los EME.

Capa	Característica	Nicho Ecológico	Composición Microbiológica
1	Color amarillo o rosado con posibles depósitos de minerales	Microorganismos resistentes a UV heterótrofos, productores de pigmentos y con capacidad de obtener energía de luz (rodopsinas)	Deinococcus Bacteroidetes Euryarchaeotas Plantomycetes
2	Verde	Microorganismos capaces de realizar fotosíntesis con O ₂ . Heterótrofos Aeróbicos. Oxidadores del H ₂ S proveniente de la descomposición de la materia orgánica y el producido por las bacterias sulfatorreductoras (ciclo del azufre).	Cyanobacteria Euryarchaeotas Sulfato oxidadores
3	Púrpura Rosada	Microorganismos capaces de hacer fotosíntesis sin O ₂ y heterótrofos anaerobios.	Bacterias purpuras sulfurosas ¹ y no sulfurosas ² . Verdes sulfurosas ³ y no sulfurosas ⁴ Euryarcheotas Crenarchaeotas
4	Oscura	Utilizan el sulfato como agente oxidante, reduciéndolo a sulfuro.	Sulfato reductores ⁵

¹Chromatiaceae y Ectothiorhodospiraceae

²Rhodospirillum y Rhodobacter

³Chlororobi

⁴Chloroflexi

⁵Desulfobacterales y Desulfovibrionales