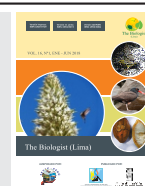




The Biologist (Lima)



REVIEW ARTICLE / ARTICULO DE REVISIÓN

BIOLOGICAL MONITORING: LICHENS AS BIOINDICATORS OF AIR POLLUTION FOR THE DEVELOPMENT OF GEOTHERMAL ENERGY

MONITOREO BIOLÓGICO: LÍQUENES COMO BIOINDICADORES DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL DESARROLLO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA

Diego Valdivia¹ & José Iannacone^{2,3}

¹ Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú.

² Laboratorio de Ecología y Biodiversidad Animal (LEBA). Facultad de Ciencias Naturales y Matemática. Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV). Lima, Perú.

³ Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Ricardo Palma (URP). Lima, Perú.

Author for correspondence E-mail: Diego Aarón Valdivia Huamán: diego_vh92@hotmail.es

E-mail: José Iannacone: joseiannacone@gmail.com

ABSTRACT

The need to use a source of clean and sustainable energy has increased in recent years, the use of geothermal energy being a promising option for an energy source that, if implemented correctly, could be used in certain periods of time, generating low cost energy and being friendly to the environment unlike fossil fuels such as oil, coal and natural gas. Geothermal energy may even have equal or greater benefits than other renewable sources such as solar, hydraulic, tidal and biomass. However, the uncertainty related to the costs in the exploration stage and the ignorance of the possible environmental impacts associated with this activity are the main difficulties to promote the investment in this type of energy. In this context, the aim of this review is to analyze theoretical aspects related to the generation of environmental impacts from the emissions of polluting gases generated by geothermal sources and the use of lichens as a bioindication tool to establish a control and monitoring system against possible changes in the air quality of a given area.

Keywords: air quality – environmental impacts – geothermal energy – lichens

RESUMEN

La necesidad de utilizar una fuente de energía limpia y sostenible, ha ido incrementándose en los últimos años, siendo el uso de la energía geotérmica una gran opción debido a que es una fuente de energía que de ser implementada correctamente, puede ser aprovechada en largos periodos de tiempo, teniendo un bajo costo de producción de energía y siendo amigable con el ambiente a diferencia de los combustibles fósiles como el petróleo, carbón y gas natural, e inclusive teniendo igual o mayor acogida entre otras fuentes renovables como las energía eólica, solar, hidráulica, mareomotriz y biomasa. Sin embargo, la incertidumbre relacionada a los costos en la etapa explorativa, y el desconocimiento de los posibles impactos ambientales asociados a esta actividad, en especial la emisión de gases contaminante a la atmosfera, son las principales dificultades para promover la inversión de este tipo de energía. En este contexto, este estudio de revisión tiene como objetivo analizar aspectos teóricos relacionados a la generación de impactos ambientales provenientes de las emisiones de gases contaminantes generadas por fuentes geotérmicas y el empleo de líquenes como una herramienta de bioindicación para establecer un sistema de control y seguimiento frente a los posibles cambios en la calidad del aire de una zona determinada.

Palabras clave: calidad del aire – energía geotérmica – impactos ambientales – líquenes

INTRODUCCIÓN

La energía geotérmica es la energía contenida en la corteza terrestre, manto y núcleo que posee muy altas temperaturas (Toth & Bobok, 2017), las cuales son mucho mayores en el interior en comparación con la superficie, llegando a exceder los 5800°C – (Zhu *et al.*, 2015), siendo esta una de las razones por la cual es considerada como una fuente inagotable de energía. La energía geotérmica es parte de las diferentes energías renovables existentes como la solar, eólica, biomasa, hidráulica y mareomotriz; sin embargo, algunas características como la alta densidad de energía a diferencia de la eólica y su continua disponibilidad en comparación a la solar, la hace una de las fuentes renovables más deseables (Soelaiman, 2016). Asimismo, el mayor interés hacia la energía geotérmica parte debido a los problemas de fiabilidad de los combustibles fósiles, el agotamiento de los recursos naturales y la compensación de los efectos del cambio climático (Gondal *et al.*, 2017). Se debe tener en cuenta que un gran obstáculo para el desarrollo de los proyectos geotérmicos se enmarca con el componente de riesgo hasta la etapa de factibilidad, es decir costos de inversión elevados asociados con alto riesgo, que en su mayoría de casos vienen de la etapa de exploración (Coviello, 1998).

La disponibilidad de la energía geotérmica se relaciona con las áreas cercanas al llamado “anillo de fuego del pacifico”, donde se encuentran las tectónicas de placas (Fig. 1). Las manifestaciones de la energía geotérmica se pueden dar a través de géiseres, fumarolas, flujos de lavas, piscina de lodos entre otros. Estas manifestaciones, nos dan a conocer la existencia de energía geotérmica que puede ser aprovechada (Soelaiman, 2016) (Fig. 2).

Un claro ejemplo de lo mencionado, ocurre en el Perú, debido a estar localizado en el anillo de fuego del pacifico (donde se produce la subducción de placas de Nazca y América del sur), es considerado como una de las regiones con gran potencial geotérmico en Sur América, razón por la cual a partir del año 2007, ha recibido un soporte técnico y económico por parte del gobierno Japonés, quienes a través de estudios de pre factibilidad, dieron a conocer el potencial de dos campos geotérmicos con un gran potencial para la generación de energía llamados Calientes y Boratera, aunque hasta el momento no se ha generado energía a través de los productos geotérmicos ni realización de pozos de exploración en el Perú (Cruz & Vargas, 2015).

En este contexto, esta investigación de revisión tiene como objetivo evaluar los aspectos teóricos asociados a la generación de impactos ambientales

provenientes de las emisiones de gases contaminantes generados por fuentes geotérmicas y el empleo de líquenes como bioindicadores para establecer un sistema de control y seguimiento frente a las posibles variaciones en la calidad del aire.

REVISIÓN

Uso de la energía geotérmica

Actualmente existen diferentes usos relacionados con la energía geotérmica, que van desde el aprovechamiento de bajas temperaturas que pueden ser usados para calentamiento de agua doméstica, invernaderos, etc., hasta el aprovechamiento de altas temperaturas para producir electricidad utilizando turbinas de vapor y generadores en centrales eléctricas. Es así que cuando la energía geotérmica usa el calor directamente es conocido como *uso directo* de la energía geotérmica, siendo el uso más común y más antiguo utilizándose como sistema de calefacción en hogares, derretimiento de nieve, calentamiento de agua en hogares, invernaderos, procesamiento

de alimento, deshidratación de vegetales, aire acondicionado, bombas de calor, entre otros. Por otro lado, cuando la energía geotérmica es convertida en energía a través de procesos termodinámicos, es conocida como *uso indirecto* de la energía siendo básicamente similar a las plantas térmicas que usan vapor como fuente de energía, diferenciándose en este caso que se usa a la tierra como una caldera natural (Soelaiman, 2016).

Impactos ambientales en la generación de energía térmica

Hoy en día la preocupación por parte del sector industrial ha cambiado de tener un énfasis únicamente en la viabilidad económica a considerar también una viabilidad ambiental; sin embargo, se debe tener en cuenta que cualquier tipo de proyecto y en especial los relacionados con producción de energía generará algún tipo de impacto ambiental, siendo el grado o extensión de éste, acorde con la tecnología a utilizar (Rybach, 2003). Aunque la energía geotérmica es considerada como un recurso limpio y sostenible a comparación de los combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas. Ésta desarrolla algunos impactos ambientales en el ambiente

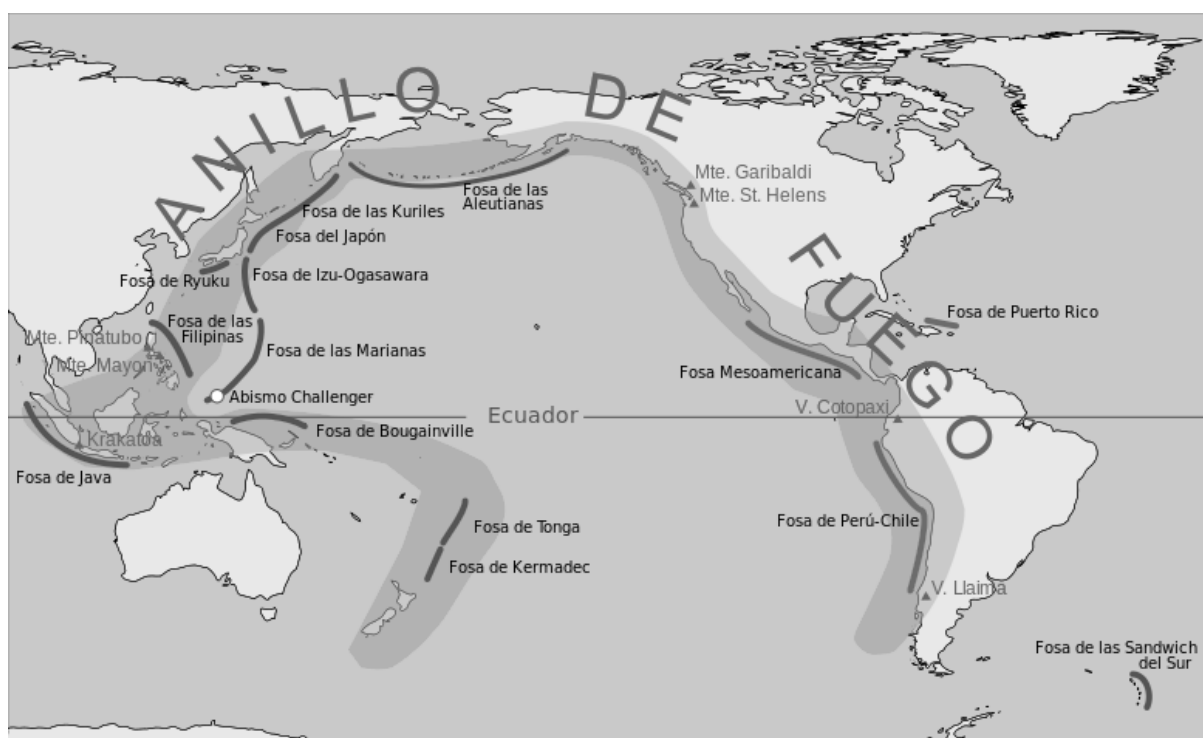


Figura 1. Anillo de fuego del Pacífico por Gringer (talk) 23:52, (UTC). Licencia bajo dominio público vía Wikimedia Commons.

(Kristmannsdóttir & Ármannsson, 2003), los cuales incluyen afectación de la superficie, ruido, riesgos sísmicos y de subsidencia, emisiones gaseosas, efluentes líquidos y residuos resultantes de las actividades de construcción, operación y desmantelamiento (Mock *et al.*, 1997). No obstante, en su mayoría muchos de estos impactos son temporales, perteneciendo muchas veces a etapas específicas del proyecto, como por ejemplo los relacionados a la alteración de la superficie del suelo y ruido que en su mayoría ocurren durante las perforaciones realizadas en la etapa explorativa.

Otros como los riesgos sísmicos y de subsidencia del terreno, no juegan un rol significativo en variaciones en el ambiente, siendo una de las soluciones inmediatas establecer un monitoreo continuo de la zona, ya que muchas veces estos se producen por las alteraciones térmicas producidas por las rocas volcánicas presentes en la zona (Kristmannsdóttir & Ármannsson, 2003). Sin embargo, es importante considerar los impactos relacionados con las descargas químicas tanto al aire como hacia los cuerpos de agua, debido a que los principales problemas ambientales asociados al uso de la energía geotérmica se dan bajo estas situaciones. Por un lado, se tiene como potencial

contaminante el efluente generado en el desarrollo del proceso geotérmico, el cual no solo produce alteraciones del cuerpo de agua por las altas temperaturas sino que genera elementos tóxicos como sulfuro de hidrógeno (H_2S), arsénico (As), boro (B), mercurio (Hg) y otros metales pesados como el plomo (Pb), cadmio (Cd), hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Zn), litio (Li) y amoníaco (NH_3); aunque el aluminio (Al) también pueden estar presentes en concentraciones dañinas. Estos procesos como en el caso de las altas temperaturas pueden producir la muerte de peces y plantas en la zona de descargar y alrededores, mientras que los contaminantes pueden envenenar peces, aves y otros animales que residen cerca de la zona impactada pudiendo producir variaciones dentro de la cadena alimenticia. Por otro lado, en relación a la contaminación del aire, esta puede ser causada por la descarga de gases geotérmicos en el vapor emitido hacia la atmósfera; siendo los principales contaminantes el dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), aunque el metano (CH_4) y mercurio (Hg); aunque el radón (Rn), amoníaco (NH_3) y boro (B) también pueden causar problemas; produciendo afectaciones al ambiente (Hunt, 2001).

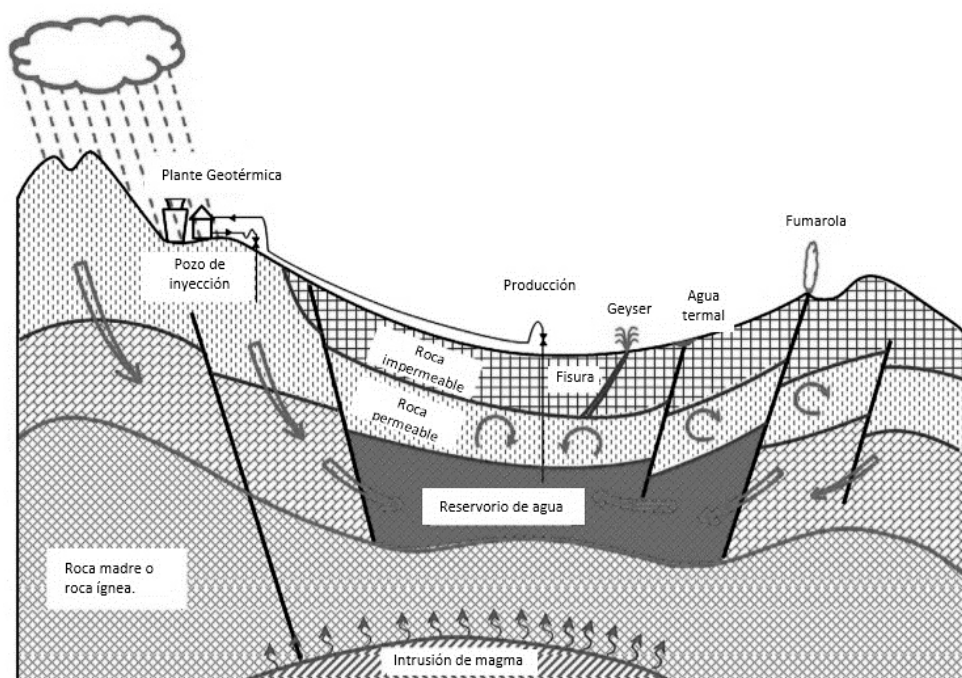


Figura 2. Típico campo geotérmico (Soelaiman, 2016).

Generación geotérmica y contaminación del aire

Es un hecho que la generación de energía geotérmica genera menores emisiones de gases de efecto invernadero como es el caso del CO₂ en comparación con otras tecnologías (Fig. 3), donde la reducción de este gas es de gran preocupación. Dicha característica es una propuesta atractiva frente al carbón, petróleo o gas (Rybach, 2003), siendo claramente una oportunidad para reducir la generación de gases de efecto invernadero y niveles de contaminación en el aire.

Dentro de los gases atmosféricos que forman parte de las emisiones geotérmicas es el sulfuro de hidrógeno el que genera mayor preocupación debido a su desagradable olor y toxicidad en moderadas concentraciones, además del daño que puede causar en humanos y plantas, siendo obligatorio en algunos países como Estados Unidos su remoción, ya que en su mayoría el H₂S se oxida en SO₂ sumándose a esto la generación de lluvia ácida. Por otra parte, aunque el CO₂ se encuentra en menor proporción en comparación con otras fuentes de energía; sin embargo, no deben ser excluidos del análisis debido a que junto con el metano son los mayores constituyentes de gases geotérmicos generando preocupación debido a su rol como gases de efectos invernaderos (Webster & Timperley, 1995; Rybach, 2003; Soelaiman, 2016).

Es importante resaltar que tanto el dióxido de carbono como el sulfuro de hidrógeno son gases pesados que tienden a concentrarse, por lo cual una amplia red de monitoreo en largos periodos de tiempo es necesario para garantizar la inexistencia de condiciones peligrosas en zonas de actividades geotérmicas (Webster & Timperley, 1995).

Líquenes como controladores de contaminantes atmosféricos

Los líquenes son una asociación entre un hongo y una "pareja fotosintética", resultante de un talo estable y una específica estructura; siendo la mayoría de los hongos liquenizados pertenecientes a la división Ascomycota (Mercado-Díaz *et al.*, 2015). Estos organismos han sido estudiados a través de los últimos años resaltando la capacidad que poseen para ser usados como biomonitores de la calidad del aire, en vista a la sensibilidad que presentan frente a diversos factores ambientales, componentes y parámetros específicos. La aplicación de líquenes puede desarrollarse de dos formas diferentes; en el primer caso se da a través de un mapeo de todas las especies de líquenes que podamos encontrar en un área específica y en segundo lugar a través del recojo de muestras de líquenes y la evaluación de la acumulación de contaminantes en los talos; o por el trasplante de líquenes de una zona sin contaminación hacia otra con contaminación (Conti & Cecchetti, 2001).

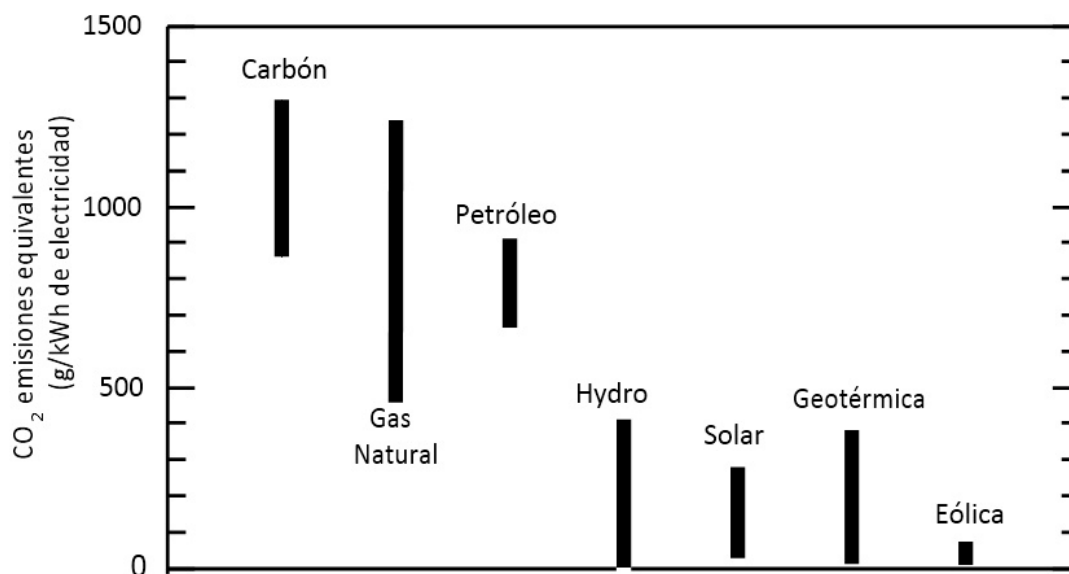


Figura 3. Gases de efecto Invernadero (CO₂ equivalente) en diferentes tecnologías de generación de energía.

Mapeo de especies de líquenes

Es a través de la correlación existente entre los cambios que se producen en las comunidades de líquenes y las variaciones producidas en la atmósfera que se lleva a cabo el desarrollo de metodologías como el Índice de Pureza Atmosférica (IPA). Este método permite determinar la calidad del aire en un área específica. El IPA, brinda una evaluación del nivel de contaminación atmosférica, basados en el número (n), frecuencia (F) y tolerancia de estos organismos en un área de estudio. Aunque actualmente, existen diferentes adaptaciones a las fórmulas originales planteadas por De Sloveer (1964) y De Sloover & LeBlanc (1968), estas pueden predecir con un buen nivel de aproximación, los niveles de contaminación de ciertos contaminantes (Moore, 1974).

Trasplante de líquenes

Una de los principales problemas para el uso de líquenes es la no presencia de estos organismos en algunas áreas debido a los altos índices de contaminación o inexistencia de un sustrato adecuado, sin embargo, la metodología del trasplante de líquenes tiene la ventaja de poder aplicarse en áreas donde no existen estos organismos, implicando un trasplante de estas especies desde zonas de baja contaminación hacia zonas contaminadas, estudiando de esta manera, los cambios morfológicos o fisiológicos que se han producido en el área de estudio (Conti & Cecchetti, 2001).

Muestreo de líquenes

Dióxido de Azufre (SO₂): El SO₂ es uno de los gases de mayor importancia en términos de investigación, debido a la sensibilidad que presenta los líquenes ante este gas. En su mayoría estos estudios tienen como objetivo dar a conocer los efectos de los compuestos de azufre sobre el líquen, en relación a su morfología, fisiología y acerca del proceso fotosintético del fotobionte (Conti & Cecchetti, 2001); y esto es debido, a que sus procesos son extremadamente sensibles al SO₂ (Deltoro *et al.*, 2002). La exposición a este contaminante ha demostrado daños en los líquenes como daños en la membrana (Fields & Clair, 1984); alteraciones ultraestructurales (Eversman & Sigal, 1987); efectos en su respiración, donde el SO₂ interfiere en el proceso fotosintético (Sanz *et al.*, 1992; Baddeley *et al.*, 1972); degradación de la

clorofila (Rao & LeBlanc, 1966); inhibición en el proceso de reproducción, observándose una reducción de los apotecios en zonas con presencia de contaminación (Estrabou *et al.*, 2004); y pérdida de potasio por altas exposiciones (Puckett *et al.*, 1977).

Metales pesados: Actualmente existen diversos estudios que dan a conocer la capacidad que poseen los líquenes para absorber partículas de la atmósfera, siendo éstas depositadas sobre la superficie del líquen o en la médula intracelular. Según lo mencionado, estas partículas permanecen inalteradas durante un largo periodo de tiempo; de esta manera el líquen puede acumular y retener muchos metales pesados, excediendo sus requerimientos fisiológicos y tolerando por consiguiente altas concentraciones de metales pesados (Loppi *et al.*, 1999). Es así que metales como plomo, zinc, cadmio, níquel, cobre, mercurio y cromo, que son elementos tóxicos para la mayoría de organismos vivos, en los líquenes pueden ser concentrados en altas cantidades (Purvis *et al.*, 2000). Asimismo, se debe tener en cuenta que dentro de los principales efectos que tienen los metales pesados sobre los líquenes se puede mencionar los relacionados con la morfología, variaciones en su vitalidad y cambios en la respuesta funcional (Branquinho, 2001). Por ejemplo, algunos trabajos reportan los efectos tóxicos que pueden producir los metales pesados en los líquenes como degradación de la clorofila o alteraciones en el proceso de fotosíntesis (Bajpai & Upreti, 2012; Gonzalez & Pignata, 1994; Puckett, 1976).

Líquenes como bioindicadores de elementos contaminantes en áreas geotérmicas

La reciente preocupación por el desarrollo de energías renovables ha generado un interés en la explotación de campos térmicos, sin embargo, a pesar de ser considerada como una energía limpia, esto no significa que no genere impactos en el ambiente (Loppi *et al.*, 1998). La energía geotérmica no es conocida como una fuente de energía que pueda afectar el ambiente, y excluyendo los efectos geológicos y geofísicos, el impacto ambiental más significativo está relacionado principalmente con las emisiones a la atmósfera de cantidades significantes de gases de efecto invernadero así como de elementos contaminantes (Kristmannsdóttir & Armannson, 2003).

Es así que en los últimos años ha sido significativo el número de estudios que tratan de lidiar con los daños ambientales resultantes de la explotación geotérmica. Aunque los equipos de medición por métodos fisicoquímicos usando tanto medidores estacionarios como automáticos siguen siendo uno de las principales fuentes de información acerca de contaminantes atmosféricos, estos suelen tener un costo muy elevado y su uso está limitado para poder evaluar el impacto biológico. Es así que se han ido realizando estudios de monitoreo biológico, utilizando como principal organismo a los líquenes debido a su sensibilidad y capacidad para acumular elementos ajenos a su composición (Loppi *et al.*, 2006). Adicionalmente su análisis permite corroborar y complementar la información suministrada por los métodos de medición convencionales, siendo de gran ventaja por tener la opción de usarse en largos periodos de tiempo.

La bibliografía revisada indica que a partir 1980 se comenzaron a realizar estudios a través del muestreo de líquenes alrededor de plantas geotérmicas, muchos de estos fueron llevados a cabo en Italia, los cuales mediante el grado de cobertura, presencia y acumulación de elementos en los líquenes permitían establecer las condiciones del área estudiada.

La preocupación en temas de contaminantes provenientes del aprovechamiento geotérmico, nace con evaluaciones realizadas a fuentes naturales, como es el caso del estudio planteado por Bennett & Wetmore (1999), en el Parque Nacional de Yellowstone en Estados Unidos, quienes ubicaron 6 zonas de medición y buscaron determinar los niveles de mercurio y otros elementos, tomando como referencia las fuentes geotérmicas naturales y despreciando cualquier influencia de plantas geotérmicas; es así que Al, As, B, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Ti, V y Zn fueron estudiados en muestras de los líquenes *Bryoria fremontii* (Tuck.) Brodo & D. Hawksw. y *Letharia vulpina* (L.) Hue, con la finalidad de conocer si el contenido en estos organismos revela algún patrón de concentración que puedan asociarse con las emisiones de los recursos geotérmicos (Loppi & Bonini, 2000). El trabajo reveló una alta correlación entre el Hg y el S, mientras que una correlación negativa con elementos provenientes del suelo, evidenciando que estas concentraciones vienen de la

desgasificación del suelo y descartando la influencia de suelos contaminados. Las concentraciones de Hg fueron inusualmente altas refiriéndolas a las características geotermales, las cuales emiten Hg. Por otro lado, los otros elementos evaluados aunque presentaron diferentes concentraciones entre la parte norte y sur del parque, no fueron significativos.

De la misma manera, otros estudios han buscado conocer si existe una contribución de las fuentes naturales en las altas concentraciones de elementos contaminantes encontradas en el aire, siendo el estudio llevado a cabo en Italia por Loppi *et al.* (1999), uno de los cuales buscó evaluar la contribución de las aguas termales y fumarolas en la presencia de posibles contaminantes atmosféricos, mediante el uso de líquenes y musgos como bioacumuladores, midiéndose Al, As, B, Cd, Cu, Fe, Hg, Mo, Pb, S, Sb y Zn. Los líquenes pueden ser usados como biomonitores de elementos geotermales, en especial para S, As, Hg y Sb. Siendo las contribuciones de As y Sb relacionadas con la presencia de fuentes geotermales. Por su parte las concentraciones de Hg en líquenes y musgos fueron de 2 a 3 veces mayores que en zonas que no estaban bajo ninguna influencia geotérmica, aunque existe la posibilidad que tal concentración puede ser atribuida a la presencia de depósitos de cinabrio localizados en la zona, no se descarta la influencia de las fuentes geotermales, mientras que altas concentraciones de sulfuro encontrados en los dos líquenes biomonitores estuvieron relacionados con la presencia de fumarolas y agua termales que son fuentes de H₂S (Nicholson, 1993).

El conocimiento de las condiciones de una zona de estudio, antes de estar bajo la influencia de alguna fuente de perturbación ambiental, es importante para conocer el impacto real que puede ocasionarse en el ambiente. Por tal motivo, realizar trabajos previos a la instalación de actividades geotérmicas es de suma importancia, siendo los líquenes organismos idóneos para cumplir con este objetivo (Hawksworth *et al.*, 2005).

Otras investigaciones, por su parte se han enfocado en conocer el impacto en la calidad del aire que pudiera ocasionar una planta geotérmica en su etapa operativa, llevando a cabos estudios alrededor de centrales geotérmicas. En su gran

mayoría estos trabajos estuvieron situados en Italia tal y como lo planteo Loppi *et al.* (1998), quien evaluó la contribución de los metales pesados (Al, Ba, Cd, Co, Cr, Fe, Mn, Mo, Pb, Sb, Sr, Ti, V y Zn) provenientes del área geotérmica de Italia donde se localizaron cuatro centrales geotérmicas, utilizándose el líquen *Parmelia sulcata* Taylor, 1836 como bioacumulador. Los resultados mostraron que los metales Ba, Cd, Cu, Mn, Pb, Sr y V no indicaron anomalías en cuanto a concentración, por su parte Al, Cr, Fe, Ti y Zn tuvieron altas concentraciones tanto en las zonas aledañas a la central geotérmica como en las partes más alejadas, las cuales no se encontraban bajo influencia de las plantas geotérmicas. Únicamente los valores de Co, Mo y Sb resultaron significativamente altos en zonas de actividad geotermal, concordando con lo señalado por Loppi *et al.* (1997), quienes mostraron que las concentraciones de Co, Mo y Sb fueron mayores en aéreas cercanas a la central geotérmicas e iban disminuyendo a medida que la distancia de ésta aumentaba, atribuyendo a éstos no solo a las emisiones producto de las operaciones de las centrales geotérmicas, sino al uso de aleaciones usadas en los tubos térmicos para evitar la corrosión (Adriano, 2001). Posteriormente, Loppi (1997), plantea un estudio en el área geotérmica de Bagnore ubicada en Italia, y buscando ser más específico utilizó un menor rango de elementos con un énfasis en la producción de Hg (elemento relacionado directamente con la producción geotérmica por muchos autores). El estudio evaluó Al, B, Cd, Cu, Fe, Hg, Pb, S y Zn de manera temporal analizando los líquenes del género *Parmelia* y *Xanthoria* en el año 1998 (antes de operación planta geotérmica) y dos años después en el 2000 (planta geotérmica en operación) indicando un 50% de incremento en las concentraciones de Hg a partir de la operación de la planta geotérmica, mientras la presencia de Al y Fe en los líquenes fueron relacionados a los suelos con presencia de estas sustancias. El Pb, Cu y Zn por su parte estarían relacionados con la afluencia vehicular en la zona, desestimando su relación con la generación geotérmica.

Dentro de los estudios realizados varios autores dieron a conocer que en la mayoría de casos la presencia de Hg y H₂S eran los contaminantes más comunes, por tal motivo Loppi *et al.* (2006) plantearon un estudio y evaluaron la influencia de

la explotación geotérmica en el área de Mt. Amiata en Italia, evaluando estos dos contaminantes. El estudio mostró que existió una moderada alteración ambiental en los alrededores de las plantas geotérmicas, en contraste con la baja alteración encontrada en lugares más alejados. Aunque se indica que las concentraciones de H₂S en la zona no son tóxicas para el ser humano, se debe considerar que puede desencadenar problemas respiratorios.

Adicionalmente, se encontró una relación entre la cantidad de Hg y H₂S, estando acorde con la planteado por Bennett & Wetmore (1999) en el Parque Nacional de Yellowstone en Estados Unidos, quienes establecieron una alta correlación entre el S y el Hg. La biodiversidad de líquenes fue estudiada y se determinó las alteraciones producidas en el área de estudio, concluyendo que alrededor de las centrales térmicas, esta es muy baja y va aumentando a medida que se incrementa la distancia desde la central. Los autores sugieren que la baja presencia de líquenes, puede ser causada por la presencia del H₂S, que es un contaminante altamente tóxico para estos organismos, como lo da a conocer Paoli & Lopi (2008), donde a través de su estudio en el líquen *Evernia prunastri* (L.) Ach., el cual fue trasplantado de una zona no contaminada hacia los alrededores de una planta geotérmica en Larderello (Italia), demuestra los cambios fisiológicos que sufre esta especie como la descoloración.

Es importante mencionar que los trabajos no solo evaluaron la presencia de metales pesados u otros elementos en líquenes; también se aplicaron metodologías como el Índice de Pureza Atmosférica (IPA) para conocer el grado de contaminación de las áreas de estudio. Autores como Loppi *et al.* (1998) lo aplicaron en el área de Travale-Radicondoli en Italia con la finalidad de evaluar los efectos ambientales provenientes de emisiones de plantas geotérmicas, utilizando a los líquenes como bioindicadores. Se calculó el IPA dando como resultado que aproximadamente a 500 m de la planta geotérmica los valores fueron más bajos, indicando una baja calidad del aire, sugiriendo que los contaminantes emitidos por las actividades geotérmicas son responsables por la zonificación de IPA obtenido, ya que mientras se alejaban de la central estos datos fueron mayores. Se complementó dicho estudio con un análisis de

Tabla 1. Referencia de estudio de líquenes como acumuladores de contaminantes atmosféricos en diferentes áreas geográficas.

Especies	Lugar	Objetivo	Elemento	Método	Referencia	
<i>Parmelia y Xanthoria</i>	Área geotérmica de Bagnore (Mt. Amiata, Italia)	Evaluar la presencia de mercurio y otros elementos contaminantes en áreas cercanas a la central geotérmica.	Al, B, Cd, Cu, Fe, Hg, Pb, S y Zn	Espectroscopía de emisión por plasma de acoplamiento inductivo Espectrometría de absorción atómica	Al, B, Cu, Fe, S, y Zn Cd, Pb y Hg	Loppi (2001)
<i>Xanthoria parietina</i>	Área Mt. Amiata (Italia)	Analizar muestras de líquenes midiendo concentraciones de mercurio en su talo.	Hg	Espectrofotómetro de Absorción Atómica Perkin-Elmer	Hg	Loppi <i>et al.</i> (2006)
Liquen - <i>Parmelia sulcata</i>	Área Mt. Amiata (Italia)	Evaluar la contribución de aguas termales y fumarolas en la calidad del aire mediante el uso de líquenes y musgos como bioacumuladores.	Al, As, B, Cd, Cu, Fe, Hg, Mo, Pb, S, Sb y Zn	Espectroscopía de emisión por plasma de acoplamiento inductivo Espectrometría de absorción atómica	Cd, Mo y Pb Al, B, Cu, Fe, S y Zn	Loppi <i>et al.</i> (1999)
Musgo - <i>Hypnum cupressiforme</i>						
<i>Parmelia sulcata</i>	Piancastagnaio en el área de Mt. Amiata (Italia)	Evaluar la contribución de los metales pesados provenientes la explotación geotérmica a través del uso de líquenes epifitos.	Al, Ba, Cd, Co, Cr, Fe, Mn, Mo, Pb, Sb, Sr, Ti, V y Zn	Espectroscopía de emisión por plasma de acoplamiento inductivo Espectrometría de absorción atómica	Al, Ba, Cr, Cu, Fe, Mn, Sr, Ti y V Cd, Co, Mo, Pb y Sb	Loppi <i>et al.</i> (1998)
<i>Bryoria fremonti</i>	Parque Nacional Yellowstone (Estados Unidos)	Determinar si el contenido de los líquenes utilizados, revelan algún patrón de concentración que pueda asociarse con emisiones de recursos geotérmicos en el parque Yellowstone.	Al, As, B, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Ti, V y Zn	Plasma acoplado inductivamente (ICP)	Al, As, B, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Ti, V y Zn	Bennett & Wetmore (1999)
<i>Letharia vulpina</i>						
<i>Parmelia caperata</i>	Travale - Radicondoli (Italia)	Evaluar los efectos ambientales provenientes de emisiones de plantas geotérmicas.	As, B, Hg y S	Espectroscopía de emisión por plasma de acoplamiento inductivo Espectrometría de absorción atómica	B y S As, Hg	Loppi <i>et al.</i> (1998)
<i>Parmelia caperata</i>	Travale - Radicondoli (Italia)	Comparar la efectividad de líquenes epifitos y hojas de árboles como monitores pasivos de elementos contaminantes emitidos por plantas geotérmicas.	As, B, Cd, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, Zn	Espectroscopía de emisión por plasma de acoplamiento inductivo Espectrometría de absorción atómica	As, Cd, Hg y Pb B, Cu, Fe, Mn y Zn	Loppi <i>et al.</i> (1997)

los contaminantes As, B, Hg y S en el líquen *Parmelia caperata* (L.) Hale. los resultados revelan bajos niveles de Hg, niveles normales de S y altas concentraciones de As y B en comparación a las áreas ubicadas a más de 500 m de la central, donde estas eran más bajas.

Del mismo modo, Loppi & Nascimbene (1998) plantearon un estudio en el área de Mt. Amiata en Italia y evaluaron 4 plantas geotérmicas. Se aplicó el IPA, obteniendo que los valores fueron incrementándose a medida que la distancia de la planta geotérmica era mayor, lo que indica alta presencia de contaminantes atmosféricos en zonas cercanas a las centrales, sugiriendo el H₂S como el principal responsable de la ausencia de líquenes en zonas colindantes a la central (Loppi & Bargagli, 1996). Con lo encontrado se sugiere que en zonas cercanas a la centrales geotérmicas hay contaminantes atmosféricos, como se refleja en las comunidades de líquenes.

Finalmente es importante mencionar que de los estudios realizados, los contaminantes comúnmente asociados a actividades geotérmicas son H₂S, As, B, Hg, y Sb; sin embargo, se debe considerar elementos adicionales como es el caso de Co y Mo (Tabla 1).

CONCLUSIONES

Se ha demostrado que aunque la energía geotérmica es catalogada como una energía limpia, no está exenta de producir alteraciones en el ecosistema, siendo uno de los principales impactos generados la descarga de emisiones de gases de efecto invernadero incondensables, H₂S y otros contaminantes hacia la atmósfera. Aunque en general se señala que estas alteraciones no son significativas del todo en cualquier situación, es recomendable que los efectos de los impactos ambientales sean monitoreados, registrados (largos periodos de tiempo) y reducidos si es necesario. Asimismo, se ha comprobado que el H₂S es uno de los contaminantes de mayor preocupación relacionados con las actividades geotérmicas, debido a su toxicidad y olor desagradable. Aunque las concentraciones de este contaminante muchas veces se encuentran

establecidas dentro de las regulaciones gubernamentales como en Italia, existen otros países que exigen su remoción por completo como es el caso de Estados Unidos.

Con base en la evidencia científica analizada, se detecta la eficiencia del empleo líquenes como bioindicadores de la calidad el aire en zonas con actividad geotérmica, resaltando su efectividad tanto de manera cualitativa como cuantitativa, relacionando en primer lugar la presencia-ausencia de estos organismos con los niveles de contaminación presentes en una zona específica, como es el caso de la casi ausencia de estos organismos en zonas cercanas a fuentes geotérmicas o en segundo lugar su capacidad bioacumuladora para detectar aquellos contaminantes presentes en un área determinada, como la existencia de los metales As, B, Hg, Sb, Co y Mo, encontradas en las muestras de líquenes recolectadas. Siendo estos contaminantes los principales componentes de las emisiones geotérmica.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a los revisores del presente artículo por sus aportes y observaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adriano, D.C. 2001. *Trace elements in the terrestrial environment. Biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals*. 2nd Ed. Springer New York.
- Baddeley, M.S.; Ferry, B.W. & Finegan, E.J. 1972. The effects of sulphur dioxide on lichen respiration. *The Lichenologist*, 5: 28-3291.
- Bajpai, R. & Upreti, D.K. 2012. Accumulation and toxic effect of arsenic and other heavy metals in a contaminated area of West Bengal, India, in the lichen *Pyxine coccinea* (Sw.) Nyl. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 83: 63-70.
- Bennett, J. P. & Wetmore, C. M. 1999. Geothermal elements in lichens of Yellowstone National Park, USA. *Environmental and Experimental Botany*, 42:191-200.

- Branquinho, C. 2001. *Lichens*. In: *Metals in the Environment, Analysis by Biodiversity*. Marcel Dekker, New York. pp. 1171-158.
- Conti, M. E. & Cecchetti, G. 2001. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment - a review. *Environmental Pollution*, 114: 471-492.
- Coviello, M. 1998. Financiamiento y regulación de las fuentes de energía nueva y renovable: el caso de la geotermia. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Cruz, V. & Vargas V. 2015. *Geothermal country Update for Peru, 2010-2014*. In: *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, April 19-24, 2015*.
- De Sloover, J.R. 1964. Végétaux épiphytes et pollution de l'air. *Rev. Questions scientifiques (Bruxelles)*, 25: 531-561.
- De Sloover, J. & LeBlanc, F. 1968. *Mapping of atmospheric pollution on the basis of lichen sensitivity*. In "Proceedings of the Symposium on recent advances in tropical ecology" (Misra, R. & Gopal, B. Eds.). pp. 42-56. Varanasi, India.
- Deltoro, V.; Gimeno, C.; Calatayud, A. & Barreno, E. 2002. Effects of SO₂ fumigations on photosynthetic CO₂ gas exchange, chlorophyll a fluorescence emission and antioxidant enzymes in the lichens *Evernia prunastri* and *Ramalina farinacea*. *Physiologia Plantarum*, 105: 648-654.
- Estrabou, C.; Stiefkens, L.; Hadid, M.; Rodríguez, J.M. & Pérez, A. 2004. Effects of air pollutants on morphology and reproduction in four lichen species in Córdoba, Argentina. *Ecología en Bolivia*, 39: 33-45.
- Eversman, S. & Sigal, L.L. 1987. Effects of SO₂, O₃, and SO₂ and O₃ in combination on photosynthesis and ultrastructure of two lichen species. *Canadian Journal of Botany*, 65: 1806-1818.
- Fields, R.D. & Clair, L.L.S. 1984. The effects of SO₂ on photosynthesis and carbohydrate transfer in the two lichens: *Collema polycarpon* and *Parmelia chlorochroa*. *American Journal of Botany*, 71, 986-998.
- Gondal, I.A.; Masood, S.A. & Amjad, M. 2017. Review of geothermal energy development efforts in Pakistan and way forward. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71: 687-696.
- Gonzalez, C.M. & Pignata, M.L. 1994. The Influence of air pollution on soluble proteins, chlorophyll degradation, MDA, sulphur and heavy metals in a transplanted lichen. *Chemistry and Ecology*, 9: 105-113.
- Hawksworth, D.L.; Iturriaga, T. & Crespo, A. 2005. Líquenes como bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medio-ambientales en los trópicos. *Revista Iberoamericana de Micología*, 22: 71-82.
- Hunt, T.M. 2001. *Five lectures on environment effects of geothermal utilization*. United Nations University. Geothermal Training Programme 2000 Report 1. 109 pp.
- Kristmannsdóttir, H. & Ármannsson, H. 2003. Environmental aspects of geothermal energy utilization. *Geothermics*, 32: 451-461.
- Loppi, S. 2001. Environmental distribution of mercury and other trace elements in the geothermal area of Bagnore (Mt. Amiata, Italy). *Chemosphere*, 45: 991-995.
- Loppi, S. & Bargagli, R. 1996. Lichen biomonitoring of trace elements in a geothermal area (central Italy). *Water, Air, and Soil Pollution*, 88: 177-187.
- Loppi, S. & Nascimbene, J. 1998. Lichen bioindication of air quality in the Mt. Amiata geothermal area (Tuscany, Italy). *Geothermics*, 27: 295-304.
- Loppi, S. & Bonini, I. 2000. Lichens and mosses as biomonitors of trace elements in areas with thermal springs and fumarole activity (Mt. Amiata, central Italy). *Chemosphere*, 41: 1333-1336.
- Loppi, S.; Cenni, E.; Bussotti, F. & Ferretti, M. 1997. Epiphytic lichens and tree leaves as biomonitors of trace elements released by geothermal power plants. *Chemistry and Ecology*, 14: 31-38.
- Loppi, S.; Cenni, E.; Bussotti, F. & Ferretti, M. 1998. Biomonitoring of geothermal air pollution by epiphytic lichens and forest trees. *Chemosphere*, 36: 1079-1082.
- Loppi, S.; Giomarelli, B. & Bargagli, R. 1999. Lichens and mosses as biomonitors of trace elements in a geothermal area (Mt. Amiata, central Italy). *Cryptogamie Mycologie*, 20: 119-126.
- Loppi, S.; Paoli, L. & Gaggi, C. 2006. Diversity of

- epiphytic lichens and Hg contents of *Xanthoria parietina* Thalli as monitors of geothermal air pollution in the Mt. Amiata Area (Central Italy). *Journal of Atmospheric Chemistry*, 53: 93-105.
- Mercado-Díaz, Joel, A.; Gould, W.A.; Gonzalez, G. & Lücking, R. 2015. *Lichens in Puerto Rico: an ecosystem approach*. General Technical Report IITF-GTR-46. San Juan, PR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, International Institute of Tropical Forestry. 76 p.
- Mock, J.E.; Tester, J.W. & Wright, P.M. 1997. Geothermal energy from the Earth: Its potential impact as an environmentally sustainable resource. *Annual Review of Energy and the Environment*, 22: 305-356.
- Moore, C.C. 1974. A modification of the "Index of Atmospheric Purity" method for substrate differences. *The Lichenologist*, 6, 156-157.
- Nicholson, K. 1993. *Geothermal fluids. Chemistry and exploration techniques*. Springer, Berlin. 132; 125-126.
- Paoli, L. & Loppi, S. 2008. A biological method to monitor early effects of the air pollution caused by the industrial exploitation of geothermal energy. *Environmental Pollution*, 155: 383-388.
- Puckett, K.J. 1976. The effect of heavy metals on some aspects of lichen physiology. *Canadian Journal of Botany*, 54: 2695-2703.
- Puckett, K.J.; Tomassini, F.D.; Nieboerj, E. & Richardson, D.H.S. 1977. Potassium efflux by lichen thalli following exposure to aqueous sulphur dioxide. *New Phytologist*, 79: 135-145.
- Purvis, O.W. Williamson, B.J.; Bartok, K. & Zoltani, N. 2000. Bioaccumulation of lead by the lichen *Acarospora smaragdula* from smelter emissions. *New Phytologist*, 147: 591-599.
- Rao, D.N. & LeBlanc, F. 1966. Effects of sulfur dioxide on the lichen alga, with special reference to Chlorophyll. *The Bryologist*, 69: 69-75.
- Rybach, L. 2003. Geothermal energy: sustainability and the environment. *Geothermics*, 32: 463-470.
- Sanz, M.J.; Gries, C. & Nash, T.H. 1992. Dose-response relationships for SO₂ fumigations in the lichens *Evernia prunastri* (L.) Ach. and *Ramalina fraxinea* (L.) Ach. *New Phytologist*, 122: 313-319.
- Soelaiman, T.A.F. 2016. *Geothermal energy*. In: Rashid, M.H. (Ed.). *Electric Renewable Energy Systems*. Boston: Academic Press. pp. 114-139.
- Toth, A. & Bobok, E. 2016. Flow and heat transfer in geothermal systems: basic equations for describing and modeling geothermal phenomena and technologies. *Basic Equations for Describing and Modelling Geothermal Phenomena and Technologies*. Elsevier, Amsterdam. 394 p.
- Webster J.G. & Timperley, M.H. 1995. *Biological impacts of geothermal development*. In: Brown, K.L. (convenor). *Environmental aspects of geothermal development*. World Geothermal Congress 1995, IGA pre-congress course, Pisa, Italy, May 1995, pp. 97-117.
- Zhu, J.; Hu, K.; Lu, X.; Huang, X.; Liu, K. & Wu, X. 2015. A review of geothermal energy resources, development, and applications in China: Current status and prospects. *Energy*, 93: 466-483.

Received January 31, 2018.
Accepted February 28, 2018.