



Acta Botanica  
Mexicana

# Adoptar los objetivos de la restauración ecológica como meta crucial al mitigar desechos mineros: una propuesta metodológica

## Adopting ecological restoration goals as a critical goal in mining tailings mitigation: a methodological proposal

Roberto Márquez-Huitzil<sup>1,2</sup> , Cristina Martínez-Garza<sup>1</sup> , Marcela Osorio Beristain<sup>1</sup> 

### Resumen:

**Antecedentes y Objetivos:** México presenta acumulaciones de materiales tóxicos e inestables desechados por la minería, llamados jales, representando un riesgo potencial y efectivo para los ecosistemas y la sociedad. La restauración ecológica en combinación con otras estrategias de mitigación ofrece una alternativa para disminuir estos impactos ambientales y revertir la degradación del ecosistema por los jales. Este trabajo plantea algunas consideraciones y propone una metodología para aplicar la restauración ecológica a los jales.

**Métodos:** Se describieron las afectaciones y riesgos ocasionados por el depósito de jales a partir de las características de los materiales y del ecosistema donde se depositan, aplicando y adecuando criterios como los utilizados en la Evaluación del Impacto Ecológico. A partir de esto, se plantearon algunas consideraciones para mitigar los jales. También se analizaron las limitaciones de algunas técnicas de mitigación con organismos o materia orgánica, por sus impactos colaterales potenciales.

**Resultados clave:** La propuesta metodológica considera acciones de mitigación de un jal que integren al ecosistema y su funcionamiento, dirigidos hacia una restauración ecosistémica. Por una parte, estos lineamientos consideran aspectos relacionados con la toxicidad y estabilidad de los jales y, por la otra, características y procesos ecosistémicos afectados por su depósito. Esta propuesta considera diez pasos que incorporan distintos aspectos que deben abordarse para la restauración en los depósitos de jales.

**Conclusiones:** Mediante un enfoque ecosistémico, como en la restauración ecológica, se resuelven los problemas ambientales de contaminación e inestabilidad de los jales. Evitando también los impactos colaterales de las propias estrategias de mitigación como la creación de trampas ecológicas o haciendo biodisponibles los contaminantes, introduciéndolos a la cadena trófica sin compensar los impactos ecosistémicos provocados por su depósito.

**Palabras clave:** efectos colaterales, jales, metales pesados, restauración de ecosistemas, trampa ecológica.

### Abstract:

**Background and Aims:** In Mexico there are accumulations of toxic and unstable materials discarded by mining, called tailings, which represent a potential and effective risk for ecosystems and society. Ecological restoration in combination with other mitigation strategies offer an alternative to mitigate these environmental impacts and reverse the ecosystem degradation caused by tailings. This work raises some considerations and proposes a methodology to apply the ecological restoration to tailings.

**Methods:** The effects and risks caused by the deposit of tailings in the open pit were described based on the characteristics of the materials and the ecosystem in which they are deposited, applying and adapting criteria such as those used in the Evaluation of the Ecological Impact. Based on this, some guidelines and considerations were proposed to mitigate tailings. The limitations of some mitigation techniques with organisms or organic matter were also analyzed, due to their potential collateral impacts.

**Key results:** The methodological proposal considers actions to mitigate a mining tailing that integrate the ecosystem and its functioning, directed towards an ecosystem restoration. On the one hand, these guidelines consider aspects related to the toxicity and stability of tailings and, on the other hand, the characteristics and ecosystem processes affected by their deposit. This proposal considers ten steps that incorporate different aspects that must be addressed to achieve restoration in tailings deposits.

**Conclusions:** Through an ecosystem approach, as in ecological restoration, the environmental problems of contamination and instability of the tailings are solved. Also avoiding the collateral impacts of the mitigation strategies themselves, such as the creation of ecological traps or making contaminants bioavailable, introducing them into the food chain without compensating for the ecosystem impacts caused by their deposit.

**Key words:** collateral effects, ecosystem restoration, ecological trap, heavy metals, mining tailings.

<sup>1</sup>Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación (CIByC), Avenida Universidad No. 1001, Chamilpa, 62209 Cuernavaca, Morelos, México.

<sup>2</sup>Autor para la correspondencia: [huitzil.r@gmail.com](mailto:huitzil.r@gmail.com)

Editor de sección: Moisés Méndez Toribio.

Recibido: 1 de febrero de 2022.

Revisado: 1 de junio de 2022.

Aceptado por Moisés Méndez Toribio: 15 de noviembre de 2022.

Publicado Primero en línea: 9 de diciembre de 2022.

Publicado: Acta Botanica Mexicana 129 (2022).



Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

Citar como: Márquez-Huitzil, R., C. Martínez-Garza y M. Osorio Beristain. 2022. Adoptar los objetivos de la restauración ecológica como meta crucial al mitigar desechos mineros: una propuesta metodológica. Acta Botanica Mexicana 129: e2019. DOI: <https://doi.org/10.21829/abm129.2022.2019>

e-ISSN: 2448-7589

## Introducción

La actividad minera es de importancia económica, pero los distintos procesos que se le asocian generan diversos impactos ambientales. Una de las afectaciones que resultan de la actividad minera es la eliminación de la vegetación en los sitios donde se busca obtener los minerales de interés (Sipriano Morales, 2016). Con esta actividad se han extraído miles de millones de toneladas de distintos minerales metálicos (Delgado Ramos, 2010; Uc Peraza, 2014; Pueblos y Comunidades de Oaxaca, 2018), desechando cantidades aún mayores de rocas molidas provenientes del subsuelo; estos materiales no son útiles para la minería y, en México, se denominan relaves, colas o jales (Reyes Mariano, 2014). En este trabajo el término a utilizar es el de jales. Los jales contienen niveles significativos de toxinas combinados con materiales generados durante el beneficio o concentración de minerales residuales y son depositados en forma de tiraderos (Nieto Ávila, 1997; Ramos-Arroyo et al., 2004; SEMARNAT, 2010; Anglés Hernández et al., 2021): a cielo abierto (Rivera Castelo, 2009; Ahumada Mexía, 2017), en barrancas (Corder, 2006), como relleno de tajos abiertos o de túneles en minas subterráneas (ELAW, 2010; Ambrocio Rosales, 2017). Personalmente, se ha observado que algunos jales pueden estar confinados, otros solo se depositan a cielo abierto sin una contención; en ambos casos, estos son arrastrados por la lluvia o por el viento. El depósito de materiales desechados por la minería representa una amenaza para el medio ambiente (Kiere et al., 2021), ya que existe una modificación considerable del relieve a nivel local y del paisaje en donde se realiza esta actividad (Islas Vargas, 2013; Pineda Juárez, 2018).

A pesar de los graves impactos ambientales provocados por los jales, en México se han establecido miles de jales clandestinos por todo el país, ocasionando graves daños ambientales (Rivera Castelo, 2009; Ahumada Mexía, 2017; SEMARNAT, 2021). Estos daños son consecuencia de la tardía e ineficiente regulación ambiental en esta materia. Entre 1995 y 1997, el Instituto Nacional de Ecología reportó en 18 estados de la República, 161 sitios contaminados y abandonados por la minería (Volke Sepúlveda y Velasco Trejo, 2002). Sin embargo, el número real de empresas que desechan sus residuos clandestinamente es incierto, pero el número potencial de depósitos de jales podría ser mayor

a 100,000 (Rivera Castelo, 2009). Fundar, Centro de Análisis e Investigación, A.C. (Fundar, 2021) denuncia que aún en 17 Áreas Naturales Protegidas Federales y Estatales (ANPs) existen 65 presas de jales mineros y, que otras 157 se ubican a una distancia de entre 1 y 5 km de las ANPs. Por ello, urge que el Senado apruebe la Reforma al artículo 46 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), para prohibir la minería en estas zonas, mismo que ya fue aprobado en la Cámara de Diputados (Fundar, 2021).

En torno al mismo tema del vacío regulatorio respecto a los jales mineros, en octubre de 2019, el Gobierno Federal puso en marcha una página de información y una plataforma donde la sociedad puede reportar los jales mineros en el país (SMG, 2019). Desafortunadamente, la sociedad no participa activamente o la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) no actualiza la información con la regularidad suficiente, dado que, hasta el 3 de agosto de 2022, en esta plataforma, solo se habían registrado 585 jales a nivel nacional (SEMARNAT, 2022). Lamentablemente, los mayores esfuerzos para ubicarlos y evaluar los impactos de la actividad minera han provenido principalmente de las instituciones de investigación (Ahumada Mexía, 2017; Armendáriz, 2016). Antes de 2018, las administraciones gubernamentales en México se enfocaron principalmente a desarrollar una legislación que incentivara la minería en el país (Cárdenas, 2013; Pérez Jiménez, 2014). Del mismo modo, se otorgaron miles de concesiones mineras en los sexenios de los presidentes Fox y Calderón; estas administraciones concesionaron 52 millones de hectáreas del territorio nacional para exploración incluyendo la de bienes minerales, lo que ha generado millones de toneladas de residuos mineros (Vargas Mergold, 2016; Moreno Montemayor, 2017). Un número menor de concesiones se dio en el sexenio de Peña Nieto, pero tan solo para el estado de Morelos, la superficie concesionada se triplicó en cuatro años de gobierno (Escobar Salazar, 2021). Al final, las administraciones de México han privilegiado la explotación minera sobre la conservación y manejo sostenible de la naturaleza.

En lo que se refiere a la regulación ambiental para el depósito de jales es muy limitada y, por lo regular, se enfoca a la mitigación de los aspectos de contaminación

y contención de los materiales. La principal Norma que se relaciona directamente con los jales es la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2004), que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales, pero se limita a describir los aspectos técnicos para preparar el sitio y construir presas que contienen jales (SEMARNAT, 2004). También existe la NOM 147 (SEMARNAT, 2007), NOM-155-SEMARNAT-2007 (SEMARNAT, 2010) y la NOM-157-SEMARNAT-2009 (SEMARNAT, 2011). Aunque existe una ley que regula la protección del ambiente como la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, esta se limita a la etapa de exploración en la minería y no regula el destino de los jales, ni protege a la naturaleza durante la explotación y el cierre de las minas (SEMARNAT, 2012). La legislación mexicana es sumamente insuficiente para la protección del ambiente en cuanto a la disposición que se hace de los jales mineros y la forma como se puede compensar el daño por esta actividad.

Un problema adicional, relacionado con el descrito anteriormente, es el año en que los jales fueron depositados en un sitio. El año de depósito influye en sus impactos al ambiente por dos motivos: i) los jales depositados clandestinamente incumplen con las especificaciones establecidas en la NOM-141-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2004) y ii) los jales creados antes de la promulgación de dicha Norma incumplen con las especificaciones y medidas de mitigación mínimas para mantener su estabilidad y reducir las condiciones de toxicidad. Algunos ejemplos de estos jales son los siguientes: 1) presas y depósitos a cielo abierto en Huautla, Morelos (Figs. 1, 2); 2) los que se encuentran en Real del Monte, cercanos a la ciudad de Pachuca, Hidalgo (Lizárraga-Mendiola et al., 2014); 3) los de presas en Nacozari de García, Sonora (Rivera Castelo, 2009); 4) los acumulados en diversas localidades de Zacatecas y San Luis Potosí (Romero y Gutiérrez-Ruiz, 2010), como el Valle de Guadalupe (Zetina Rodríguez, 2012) y Villa de la Paz, Cerro de San Pedro, Charcas, Cedral y Real de Catorce, Zacatecas, que se han explotado desde hace siglos (Montes Rocha, 2016); 5) zonas mineras implementadas a partir de la época de la Conquista; 6) zonas mineras existentes desde la época virreinal y que

han sido productoras de oro, plata, plomo, zinc y cuentan con almacenamientos de jales en el noroeste y el sur del país, asociados a la producción de metales tradicionales, al cobre y al grafito, óxido de titanio, hierro y fosfatos (Rivera Castelo, 2009). Por tanto, resulta indispensable conocer la distribución de todos los depósitos de jales, tanto registrados oficialmente como clandestinos y verificar si han aplicado estrategias integrales para mitigar todos los impactos ecológicos y ambientales provocados por su depósito.

La alta toxicidad de los jales mineros no es la única amenaza ambiental, sino también la inestabilidad ocasionada por la falta de estructura de los materiales que contienen (Fig. 1) (Rico, 2016). Al carecer de una estabilidad estructural, en combinación con los factores ambientales como los escurrimientos pluviales, pueden ocurrir los siguientes incidentes: i) el deslizamiento en masa de jales durante lluvias o sismos severos, ii) rotura del talud del almacenamiento por flujo interno del agua a través de la superficie exterior de jales no protegidos adecuadamente (Reyes Mariano, 2014; Figs. 1, 2). Existen antecedentes de incidentes relacionados con el deslizamiento de residuos mineros en México, debido a la inestabilidad producida por insuficiente regulación de escurrimientos pluviales y rotura de conductos que transportan o están en contacto con los jales, provocando derrames de estos residuos (Reyes Mariano, 2014). Como resultado, en nuestro país se ha reportado el derrame accidental de jales hacia los cauces de los ríos cuando menos una vez al año, causando impactos ambientales y pérdida de vidas humanas (Ramírez Rodríguez, 2001). La toxicidad e inestabilidad de los depósitos de jales representa un riesgo para la biota local y las comunidades humanas establecidas en su vecindad o hacia donde se desplacen (Luque Agraz et al., 2019). Cuando esto ocurre a cielo abierto, destruye los ecosistemas y también puede afectarlos al dispersar sus contaminantes en la formación de polvaredas (Tamayo, 2014; Vargas Mergold, 2016), haciendo necesaria la mitigación de sus impactos ambientales (Manzanares Acuña et al., 2005; Dávila Luna et al., 2018).

La mitigación es el proceso de prevenir, evitar o minimizar los impactos negativos; se puede actuar de distintas formas (Trewick, 1999): 1) evitando realizar una acción particular, 2) limitando el grado de una acción, 3) reparando, rehabilitando o restaurando el ambiente degradado y





**Figura 1:** Jal minero en Huautla, Morelos, México, depositado hace 30 años con una presa que se disolvió con la lluvia. Foto: Márquez-Huitzil, R. 2021.

4) suministrando recursos substitutos. Las estrategias de mitigación se pueden diferenciar de acuerdo con la recuperación de un ecosistema degradado respecto a su estado original (Meffe y Carroll, 1994; Fig. 3); entre ellas se encuentran la *remediación*, la *rehabilitación* y la *restauración ecológica*. Estas estrategias de mitigación pueden diferenciarse por el grado de recuperación del ecosistema y por los factores de deterioro que atienden (Bradshaw, 1983; Gann et al., 2019).

Las dos primeras son consideradas como restaurativas, ya que reducen las causas y efectos de la degradación, favoreciendo la recuperación del ecosistema al disminuir los impactos ecológicos y en la sociedad (Gann et al., 2019). La *remediación* agrupa distintas técnicas para controlar los efectos provocados por los contaminantes (Volke Sepúlveda y Velasco Trejo, 2002), y la *rehabilitación* busca restable-

cer el funcionamiento del ecosistema para la provisión de algunos servicios ecosistémicos que podrían incluso derivarse de ecosistemas no nativos, ya que su objetivo final no es recuperar al ecosistema nativo (Gann et al., 2019). Por otro lado, la *restauración ecológica* tiene como meta lograr una recuperación sustancial del ecosistema en relación con un modelo de referencia apropiado, independientemente del tiempo necesario para lograrla (Gann et al., 2019). Al buscar una restauración ecológica su meta es la autosostenibilidad del sistema, que sea armónico ecológicamente con el paisaje natural y que brinde la mayor cantidad de servicios ecosistémicos (Gann et al., 2019).

La restauración ecológica es la estrategia de mitigación que permite recuperar autosuficiencia del ecosistema (Fig. 3). Las distintas actividades e intervenciones (estrategias de mitigación), cuando son aplicadas para recuperar





**Figura 2:** Depósito de jales “Las Presas” en Huautla, Morelos, retenido por presas de jales elaboradas con los mismos materiales. Las flechas señalan montículos de materiales dispersos formados por el daño de la erosión hídrica a la antigua presa de jal. Imagen: Google Earth, 2021.

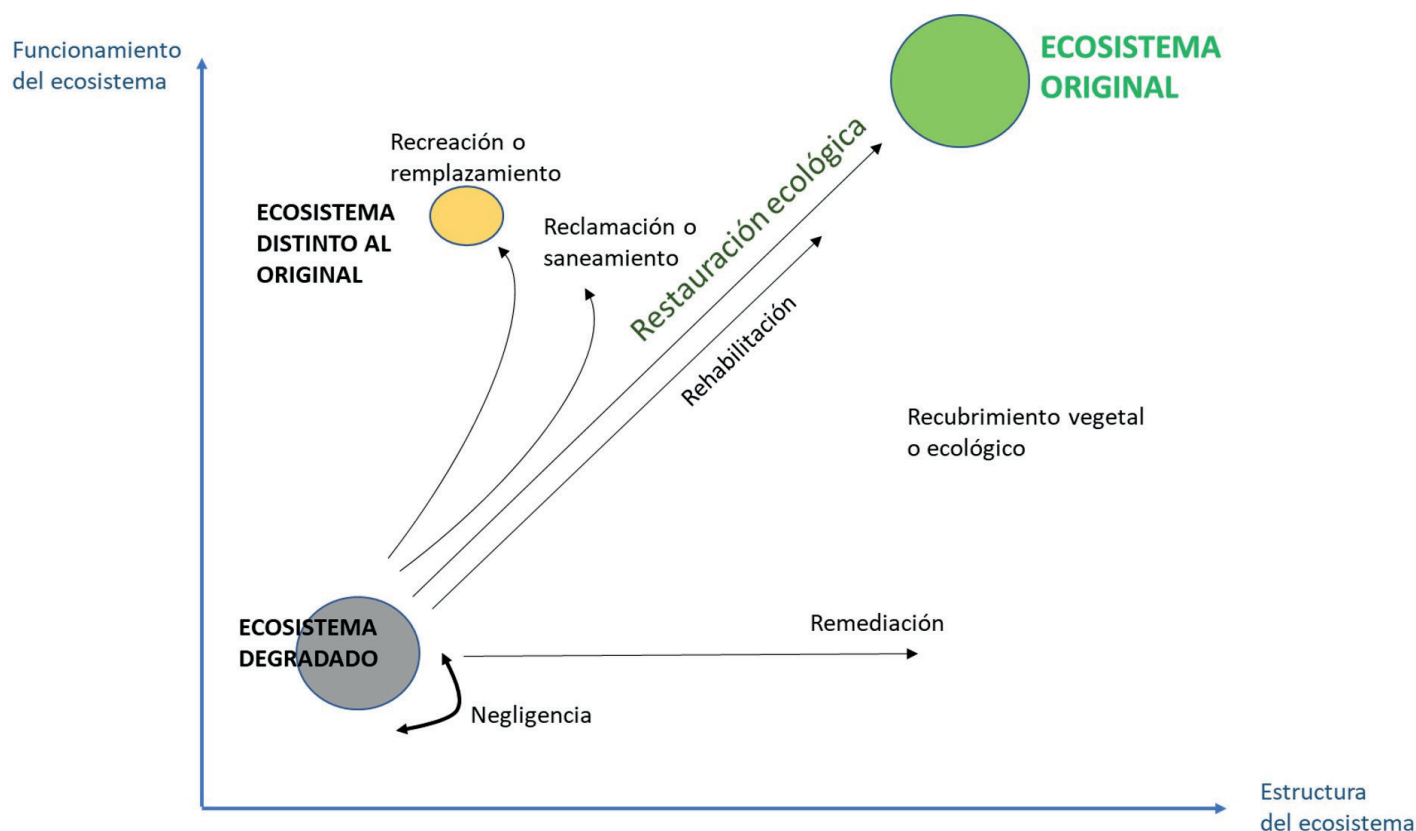
los elementos estructurales y funciones del ecosistema, deben tener una interconexión entre ellas para formar parte de un continuo restaurativo; durante la interconexión se deben reconocer las características de la localidad a restaurar, lo que permitirá la recuperación de los servicios ecosistémicos en calidad y cantidad (Gann et al., 2019). Por lo anterior, la restauración ecológica resulta ser una estrategia adecuada para recuperar las características originales del ecosistema en sitios afectados por el depósito de jales.

El objetivo de esta revisión es presentar las consideraciones que fueron la base en las que se apoya la propuesta metodológica de restauración ecológica en jales mineros. Se plantearon once consideraciones que buscan ampliar los límites encontrados en la literatura científica y técnica abordando la problemática de los jales e integrar una sola metodología que sea accesible a todo lector. Así mismo, se trata de combinar el análisis de la información científica desde diferentes puntos de vista con la visión técnica con que se revisan y cuestionan los proyectos que tienen un impacto ecosistémico y/o de restauración, buscando la restauración ecológica como meta. Se consideran aspectos como la ecología, la ecología de la restauración, la restauración ecológica, la estadística en cuanto al diseño experimental y sus limitaciones, el manejo de ecosistemas

y la toma de decisiones en el sector ambiental para apoyar esta propuesta. Las consideraciones presentadas son la base y justificación del camino que toma esta propuesta metodológica y del por qué no solamente se habla de remediación o rehabilitación en términos generales, sino de una selección de técnicas dentro de cada una de estas estrategias, apoyada en la Evaluación del Riesgo Ecológico (ERE, Treweek, 1999). Así mismo, este documento permite compartir con el lector algunas de las investigaciones y metodologías que existen en la literatura y en las que se pueden apoyar, tratando de sugerir, advertir, pero no apegarse a un estudio en particular para plantear e implementar un proyecto de restauración ecológica en jales. La propuesta surge del interés por hacer una síntesis entre la información científica y la realidad, evaluando y cuestionando el impacto ecosistémico que puede tener la implementación de proyectos. El objetivo es lograr que la restauración del ecosistema vaya más allá de las propuestas que se limitan a un aspecto como la contaminación o la inestabilidad particulares para la resolución a los problemas ambientales generados por los jales. Se discuten las limitaciones y omisiones detectadas en estudios y propuestas que se hacen para mitigar los impactos ecológicos y ambientales de los jales mineros, tratando de integrar los aspectos mencionados anteriormente para apoyar esta propuesta.

## Materiales y Métodos

La presente propuesta surge de la integración de distintas perspectivas en la mitigación de los procesos de degradación y en la restauración del ecosistema (Fig. 4). Se toma como base la experiencia en la rehabilitación de una mina de roca caliza con la generación de un modelo propuesto para la restauración de canteras (Márquez-Huitzil et al., 1998; Márquez-Huitzil, 1999). Toma en consideración también el entendimiento del papel de la remediación en la descontaminación ambiental y del uso de distintas técnicas para lograrlo; la forma como la rehabilitación mitiga los procesos de erosión, inestabilidad de los sitios, contando con distintas técnicas para hacerlo (Brown et al., 1986, por mencionar una fuente). Primeramente, desde los materiales revisados que incluyen literatura sobre restauración ecológica y ecología de la restauración (Holl y Aide, 2011; Temperton et al., 2004; Sánchez et al., 2005; Márquez-Huitzil, 2005; Palmer et al.,



**Figura 3:** Diagrama que muestra la relación entre las estrategias de mitigación con la recuperación del ecosistema original. Modificado de Bradshaw (1983).

2016; Chazdon y Uriarte, 2016; Gann et al., 2019); revisión de la literatura básica de Ecología (Begon et al., 2005) (Fig. 4). Con base en el análisis sobre la restauración de minas publicado en Bradshaw y Chadwick (1980), donde definen a la restauración ecológica como la estrategia que busca recuperar las características de un ecosistema degradado, dañado o destruido, así como la relación de esta con otras estrategias de mitigación. Considerando el planteamiento anterior, en nuestro trabajo se desarrolló una metodología que involucró lo siguiente: conocimientos adquiridos en la revisión y generación de opiniones técnicas sobre proyectos con un impacto ambiental, en temas como la liberación de insectos como controles biológicos, la introducción de especies fuera de su rango de distribución original, la experiencia en la restauración de selvas, ríos, manglares, y proyectos de infraestructura con un impacto a nivel de paisaje o de cambio de uso del suelo y la capacitación a funcionarios públicos y sociedad civil en el tema de restauración ecológica, durante el período de 2001 a 2010 en el Instituto Nacional de Ecología (ahora Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático).

Entre los temas revisados se incluye el análisis de las descripciones de los impactos socioambientales de los jales mediante Sistemas de Información Geográfica y de percepción remota, las descripciones de los impactos de los jales al ambiente físico descritos en la literatura (Rivera Castelo, 2009; Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006; Ahumada Mexia, 2017), el uso de estrategias utilizadas para su remediación y rehabilitación (Moriarty, 1999; Volke et al., 2005); la integración y síntesis de información que se forma al revisar e interactuar con especialistas de distintas áreas para la resolución de problemas ambientales con un enfoque ecosistémico. Revisamos adicionalmente, reportes técnicos de minería, mitigación, remediación y de rehabilitación de minas y jales obtenidos al colaborar en la restauración de una mina a cielo abierto en Cuautlapan, Veracruz (Márquez-Huitzil, 1999). Toda la información fue compilada de bibliotecas, haciendo búsquedas en internet, o compartidas directamente por investigadores trabajando en el tema, desde 1995 a diciembre de 2021.

Tomando como base la información recopilada se plantean algunas consideraciones que deben tomarse en cuenta

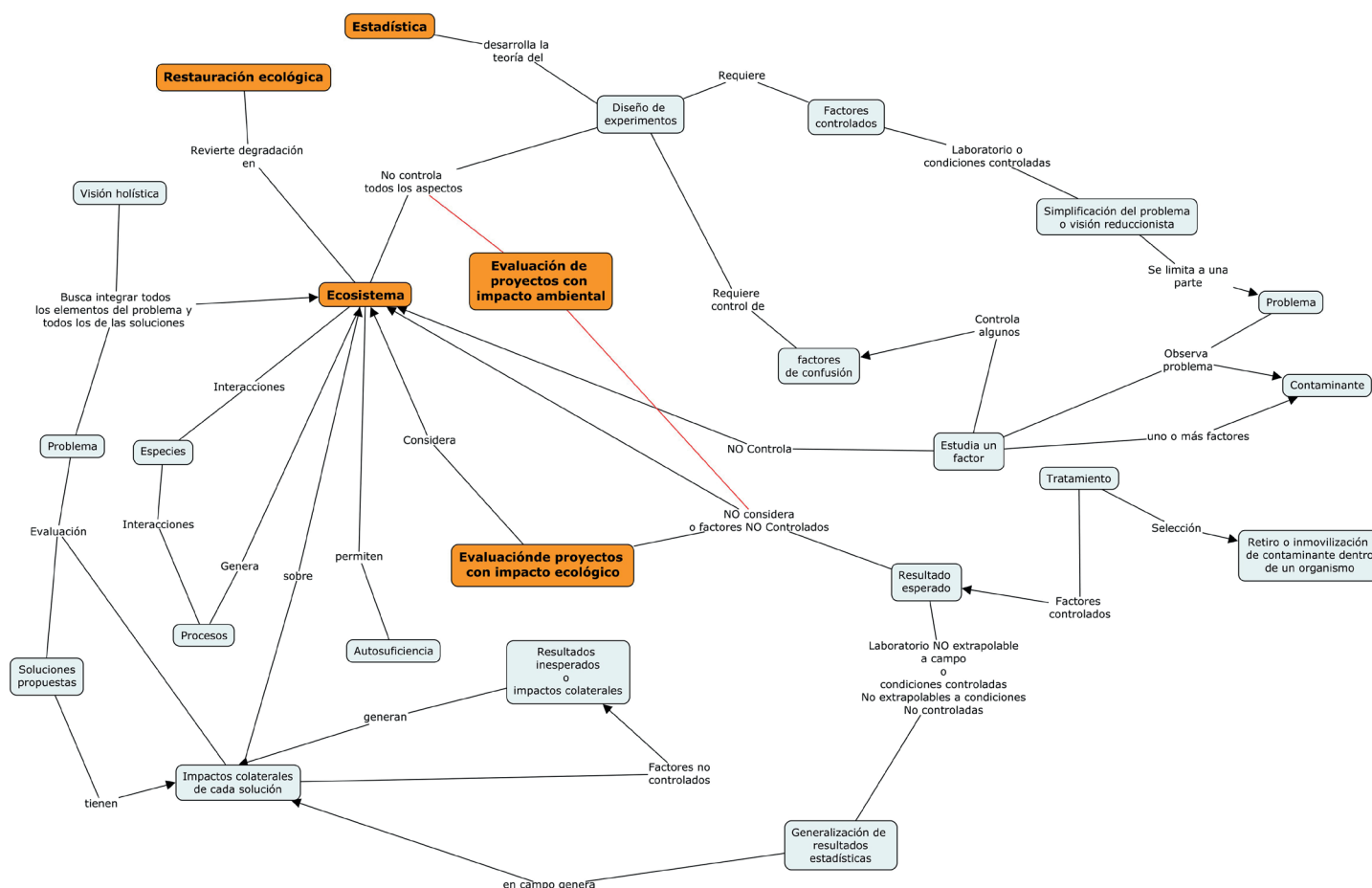


antes de elaborar una propuesta de mitigación de jales (Fig. 4). En este estudio se propone la restauración como la estrategia de mitigación más adecuada para revertir los impactos ecológicos causados por los jales mineros, pero en combinación con otras estrategias de mitigación (remediación y rehabilitación) al momento de intervenirlos; analizando en todo momento los impactos colaterales que representan algunas de las técnicas utilizadas comúnmente dentro de la remediación o de la rehabilitación para seleccionar solo las más adecuadas para el ecosistema. Así mismo, se revisaron algunos métodos para evaluar su impacto sobre el ecosistema, la evaluación ecosistémica rápida y algunas utilizadas con mayor frecuencia en la restauración de ecosistemas con un menor disturbio, para enmarcar la propuesta dentro de una restauración ecológica.

## Resultados

## Consideraciones antes de iniciar la mitigación sobre los jales

Antes de iniciar un proyecto e invertir recursos será necesario garantizar que podrán ejecutarse los trabajos de restauración. En caso de que los materiales se encuentren en un predio particular o comunal debe consultarse a los propietarios legales del predio. En la actualidad, uno de los obstáculos que puede enfrentar la restauración de un depósito de jales es que se les ha dado utilidad económica. Los jales aún pueden ser útiles por los metales que contienen y que anteriormente no se extrajeron por falta de tecnología; también son vistos como útiles en la construcción o el relleno de carreteras (Lizárraga-Mendiola et al., 2017), aunque



**Figura 4:** Planteamiento de la metodología para la restauración de jales mineros. Toma como base los aspectos que se resaltan en naranja. La generación de este modelo implicó combinar el pensamiento sistemático del análisis científico con el práctico como lo analiza el funcionario público del sector ambiental e integrarlos con aspectos de otras áreas relacionadas entre sí, como con los supuestos del diseño experimental en la estadística. A partir de esto, se analiza tanto la problemática que generan los jales al depositarse en el ecosistema, su relación con el paisaje, y las distintas soluciones que pueden aplicarse para resolver el problema.

no se consideran los riesgos por su toxicidad y presencia de elementos potencialmente tóxicos (EPT). Desafortunadamente, quienes convencen a las comunidades de vender los jales no profundizan con los propietarios acerca de los impactos ambientales asociados al procesamiento de los jales, ni que esos daños pueden quedarse sin mitigarse. Antes de iniciar un proceso de restauración ecológica es indispensable la autorización de las comunidades y tomadores de decisiones en donde se pretende implementar el proyecto (Gann et al., 2019). Los métodos de investigación participativa permiten resaltar las prioridades y perspectivas locales; buscando el involucramiento de la población en las investigaciones y la planeación, fortaleciendo su efectividad y ahorrando tiempo y dinero en el largo plazo (Cornwall y Jewkes, 1995). Durante la toma de decisiones debe involucrarse a los representantes legales y a la población en general relacionados con la tenencia de la tierra y legalidad a la toma de decisiones (Pahl-Wostl, 2002). Las comunidades no solo deben involucrarse como fuerza laboral para implementar los proyectos, sino teniendo un papel activo en la confección de decisiones críticas en todas las partes del proceso y aportando recomendaciones para fortalecer los esfuerzos junto con los tomadores de decisiones (Ortega-Álvarez et al., 2021).

Por otra parte, el espacio ocupado por los jales forma parte de un ecosistema y los jales crean nuevas condiciones (Azamar Alonso et al., 2021) que, si se rehabilitan o remedian, permiten la colonización natural en estos jales contaminados. Por tanto, en el Cuadro 1 se enlistan algunas consideraciones que se tomaron en cuenta en la elaboración de esta propuesta metodológica.

La propuesta metodológica se detalla a continuación, junto con sus componentes principales (Fig. 5). (1) Inicialmente se realiza una evaluación rápida de la zona a dos niveles (Sayre et al., 2000): de manera local (1a) se planifican las estrategias de mitigación sobre el jal en base a las características del sitio (1.1a), considerando sus relaciones a nivel de paisaje como pueden ser las zonas que potencialmente podrían afectarse por el desplazamiento de los materiales, las afectaciones a zonas aledañas como vegetación nativa, humedales, escurrimientos, asentamientos humanos o infraestructura, basados en lo que hay en el ecosistema de referencia (1.1b), así como en sitios natura-

les (1.1c) y sitios transformados por las actividades humanas (1.1d). En el sitio se describen características (2a) como la toxicidad (2ac), inestabilidad (2aa), y condiciones de los materiales o si estos se movilizan con el viento o el agua (2ab). También se describe si se encuentran descubiertos de vegetación, y las especies vegetales y animales que interactúan con el jal y entre sí, así como las interacciones con aves, polinizadores, vegetación establecida, especies buscando madrigueras, entre otros (1aa) o en el medio físico (1ab). Las características microclimáticas y ecológicas en el ecosistema de referencia se describen; esta descripción puede incluir información sobre la composición de las especies, la estructura de la vegetación, la diversidad, las poblaciones vegetales, y la edafofauna (indicador biológico de la fertilidad del suelo) en las áreas naturales (1.1b). A escala del paisaje (1b), se describen las características del relieve, escurrimientos, infraestructura cercana, asentamientos humanos, el grado de fragmentación y conectividad espacial, entre otros componentes: características en sitios conservados (1.1c) y en sitios transformados por el hombre (1.1d).

Tomando como base la evaluación rápida anterior, se hace una planeación en donde se consulta a los poseedores de la tierra; se identifican los procesos a mitigar y son seleccionadas las técnicas dentro de cada estrategia de mitigación (3). Los trabajos se orientan para favorecer la sucesión natural de plantas y animales (3b). Finalmente, se pueden reintroducir especies nativas que no arriben a la zona por sí mismas (4).

A continuación, se describe detalladamente el diagrama con los puntos propuestos para la restauración de un jal, los cuales pueden sustituirse de acuerdo con las necesidades de cada caso particular:

### (1) Caracterización estructural y de la composición del jal

Los jales o relaves mineros son clasificados por Rossiter (2007) como tecnosuelos o tecnosoles, ya que son depósitos de materiales cuyas propiedades y funcionamiento están dominados por las actividades humanas técnicas; dentro de este grupo se incluyen a los materiales excavados desde la profundidad de la pedósfera donde no fueron influenciados previamente por procesos superficiales, con propiedades sustancialmente distintas a las del ambiente





**Cuadro 1:** Consideraciones utilizadas para el planteamiento de la propuesta y parte de la literatura en la que se apoya. Hay que resaltar que las consideraciones no solamente toman en cuenta la literatura sino también análisis, síntesis y reflexión sobre cada una de las consideraciones que se enlistan. La literatura es para dar una base a cada consideración en el contexto de la restauración de ecosistemas.

#	Consideración	Fuente
1	Al mitigar los jales debe adoptarse como objetivo principal la recuperación del ecosistema de forma integral, buscando que las estrategias aplicadas recuperen la totalidad o la mayor cantidad de elementos y procesos del ecosistema original.	Bradshaw, 1983; SER, 2004; Gann et al. 2019
2	Los jales están formados de rocas trituradas y molidas, cuyas partículas son semejantes a las partículas de arenas, arcillas y limos de un suelo que fue formado por procesos naturales como el intemperismo, pero su origen es distinto, por lo que son clasificados como tecnosoles.	MacGregor Arroyo, 1992; Nieto Ávila, 1997; Ramos-Arroyo et al., 2004; Volke et al., 2005; Rossiter, 2007; Haldar, 2018
3	Antes de aplicar una técnica de mitigación, deben evaluarse los impactos ecológicos potenciales asociados a la misma.	Treeweek, 1999
4	La restauración de un jal implica el uso de una o más técnicas agrupadas dentro de la remediación o de la rehabilitación (i.e., remediación de suelos, estabilización de materiales, rehabilitación de suelos).	Meffe y Carrol, 1994; Bradshaw, 1983; Bradshaw y Chadwick, 1980; Brown et al., 1986
5	El depósito de jales ocupa un lugar dentro de un ecosistema e interactúa con los procesos a nivel de paisaje.	Aguirre-Salado et al., 2017; Ahumada Mexía, 2017; Buczyńska, 2020
6	La mitigación de jales, por lo regular, se limita a controlar la toxicidad de los materiales y sus metales, pero no considera que, al ser depositados a cielo abierto, la problemática en el ecosistema es mucho más compleja.	Ortega, 2014; Camarillo Reyes, 2014; Naidu et al., 2015; Annable et al., 2020
7	En el caso de los elementos potencialmente tóxicos (EPT), incluidos los metales pesados, el factor que genera mayor peligro es su biodisponibilidad.	Castañeda-Bautista, 2016; Cervantes-Ramírez et al., 2018
8	El uso de organismos vivos o materiales orgánicos en la rehabilitación o en la remediación de un jal contaminado con metales pesados o EPT, atrae a la biota nativa, pero puede impactar al ecosistema a distintos niveles, creando una trampa ecológica, es decir, un ambiente que puede ser percibido por la biota de la zona como un nuevo hábitat.	Battin, 2004; Robertson y Hutto, 2006
9	La colonización de los jales por especies nativas tolerantes a la toxicidad puede introducir los contaminantes a la cadena trófica por las interacciones con otras especies como herbívoros, polinizadores o frugívoros.	Battin, 2004; Robertson y Hutto, 2006
10	Los tratamientos probados en laboratorio o para resolver problemas particulares en los jales deberían extrapolarse solo a condiciones similares a las del sitio donde fueron obtenidos o para el problema para el que fueron planteado, considerando incluso los supuestos del modelo utilizado para el diseño experimental, perdiendo su validez al extrapolarse a condiciones de campo.	Méndez Ramírez et al., 1996; Méndez Ramírez, 2012; Hernández Sampieri et al., 2014
11	Los jales a cielo abierto interactúan con los factores abióticos (i.e., suelo, agua, viento, geomorfología, fenómenos meteorológicos, pendientes, hidrología) y bióticos (i.e., bacterias, hongos, protozoarios, plantas y animales), incluidas las interacciones entre estos y en distintas escalas geográficas (local, de paisaje, regional, global), por lo que las estrategias para mitigarlos deberían de considerar esta complejidad.	Treeweek, 1999; Sanderson y Harris, 2000; Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006; Rivera Castelo, 2009; Siebe et al., 2016



donde son depositados. Sugerimos subdividir esta descripción de la siguiente forma: i) la descripción del tecnosuelo y, ii) la descripción de los jales como un suelo contaminado.

Se considera que la restauración debe contemplar distintos aspectos relacionados con los riesgos que representan los depósitos de jales: las características estructurales del depósito, la forma en que fueron colocados los materiales (a cielo abierto, en presas de jales), las particularidades de los materiales que forman los jales y la dinámica de estos. Entre las características estructurales del depósito de jales se encuentran la morfología, las dimensiones,

la presencia de estructuras de contención como presas u otros elementos que confinen los materiales, la existencia de una cubierta vegetal, las pendientes de los taludes, la susceptibilidad a la erosión hídrica y eólica, así como el posible colapso de los materiales (Vick, 1990; Rivera Castelo, 2009; Cruz Ruiz, 2017). Las características estructurales y de los materiales, así como las especies vegetales que han colonizado el jal, también interactúan con factores ambientales como el viento, la lluvia o los sismos, y ocasionan daños a los ecosistemas desde el momento en que son depositados y a través del tiempo (Dávila Luna et al., 2018), por lo que conviene realizar la descripción de estas características

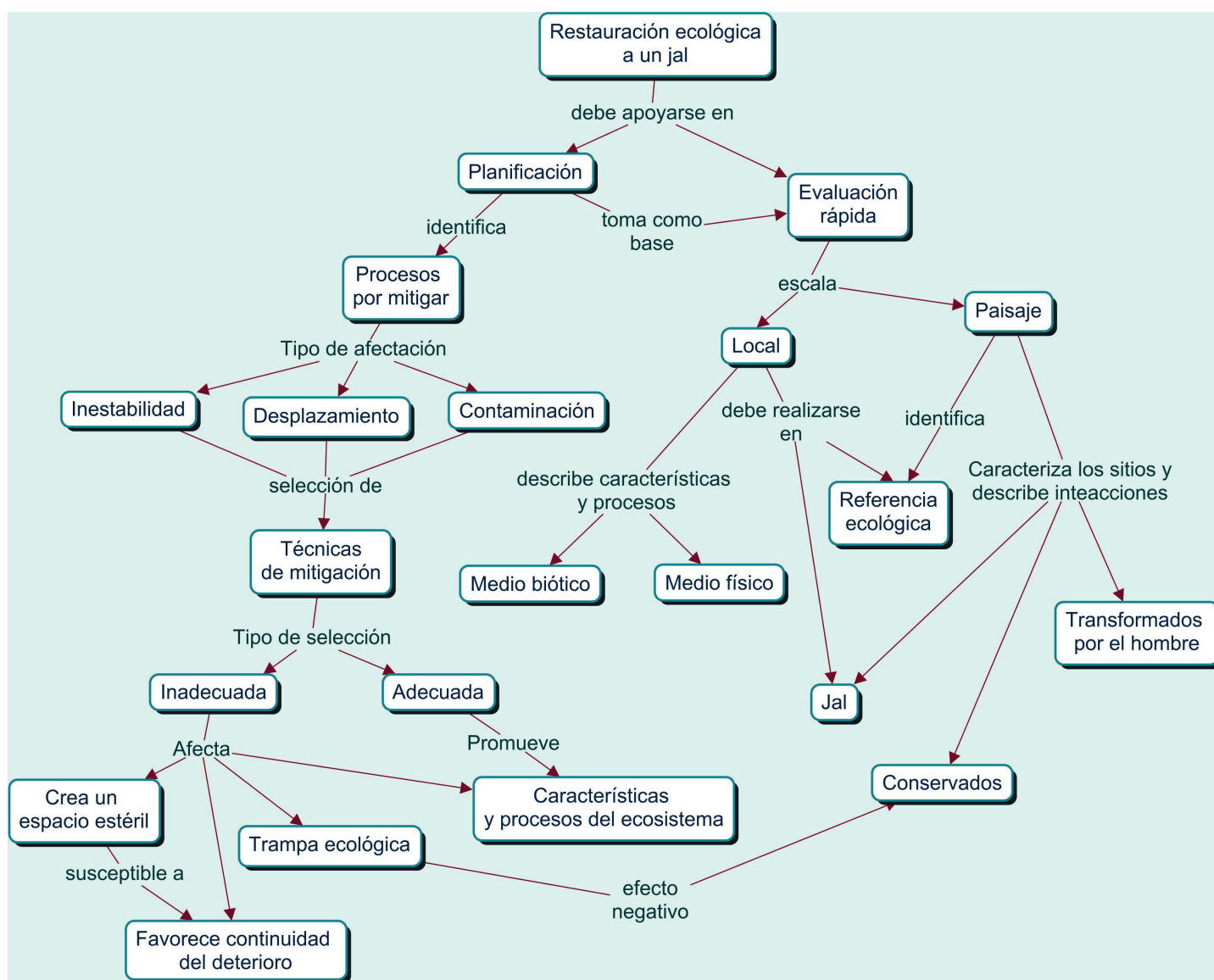


Figura 5: Propuesta metodológica a seguir en la restauración de un jal.



junto con una Evaluación Ecosistémica Rápida (EER) como la descrita por Sayre et al. (2000). Tener una descripción de las características mencionadas permite identificar y predecir los posibles riesgos asociados a los materiales como la erosión, el movimiento por el viento, las sustancias tóxicas o el desplazamiento en masa que puedan relacionarse con su estructura (i.e., riesgos de desplazamiento en masa). Las características relacionadas con la composición de los jales permiten identificar sus propiedades fisicoquímicas y describir la dinámica de las partículas que los componen, medir su toxicidad y describir la interacción que puedan tener con los organismos a nivel superficial y subsuperficial (Wardle, 2010).

En la descripción del tecnosuelo se caracteriza su estructura, lo que puede realizarse mediante la elaboración de un perfil de suelo (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006). Para la descripción del perfil de suelo puede utilizarse el “Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo” de Siebe et al. (2016). Por otro lado, la descripción de los jales como un suelo contaminado considera la identificación de los contaminantes en muestras de los jales a distintas profundidades y sitios sobre el jal; también la evaluación de la dinámica de las sustancias tóxicas que se relaciona con las propiedades de los jales, los contaminantes contenidos en ellos como los metales pesados o las sustancias utilizadas en la recuperación de los metales y la interacción con los procesos ambientales como el viento, los escurrimientos, la sismicidad, entre otros (MacGregor Arroyo, 1992; Nieto Ávila, 1997; Bundschuh et al., 2011; Chávez Ramírez, 2020). Es necesario evaluar la producción de lixiviados tóxicos desde los jales (Lottermoser, 2010; Pozo-Antonio et al., 2014; García Aguirre et al., 2018; Peña-Limón y Paredes-Aguilar, 2019), las características, composición y origen de los materiales (Volke et al., 2005; Meuser, 2013), así como el movimiento que siguen los contaminantes en el medio (i.e. contaminantes contenidos y su posible dispersión en forma de lixiviados (SEMARNAT, 2007, 2010, 2011, 2012, 2016; García Aguirre et al., 2018; Peña-Limón y Paredes-Aguilar, 2019)). Existen distintos métodos para evaluar el riesgo por la toxicidad de los sólidos que pueden ser utilizados para la medición de los contaminantes en suelos, sedimentos, lodos o material biológico. Algunos ejemplos son el caso de los metales pesados que se iden-

tifican por un alto peso atómico, con gravedades específicas más grandes de cinco y especialmente, aquellos tóxicos para los organismos como Cu, Zn, Pb, Cd, Mi, Hg, Cr y los metaloides (As) (Zhang, 2007). En suelos, por ejemplo, se utilizan distintos métodos de fraccionamiento de metales para determinar su concentración mediante la espectrofotometría de absorción atómica (Martínez y Rivero, 2005). En seres humanos, por ejemplo, se puede realizar una evaluación de cambios nucleares en el epitelio bucal mediante un conteo de los núcleos afectados por exposición a metales pesados (Reyna Rosas, 2009). También para los suelos puede utilizarse un análisis multi-elementos para determinar las concentraciones de metales pesados por espectrometría de masas por inducción de plasma, entre otros métodos (Candeias et al., 2014). La caracterización de los jales debe considerar también aspectos como la definición de la magnitud y tipo de contaminación, el muestreo y los análisis fisicoquímicos de las muestras (USEPA, 1991). Dependiendo de las características del jal, de ser posible, resulta importante definir el perfil horizontal y vertical de los contaminantes, esta información resulta crítica para la selección de la tecnología de remediación adecuada (Volke Sepúlveda y Velasco Trejo, 2002). El objetivo de estas descripciones es conocer las propiedades y dinámica de los jales, y elaborar un diagnóstico para identificar las estrategias adecuadas para caracterizar el comportamiento de los contaminantes, antes de considerar las técnicas para la contención de los materiales y remediación de las sustancias tóxicas.

## (2) Evaluación Ecosistémica Rápida

La Evaluación Ecosistémica Rápida (EER, o REA, por sus siglas en inglés) tiene como finalidad caracterizar y conocer el estado de conservación del ecosistema (Sayre et al., 2000). La EER se realiza a escala de paisaje (gruesa) (Farina, 2000) y local (fina; Sayre et al., 2000). Es importante que la descripción se realice considerando el espacio antes del depósito de los jales, por lo que algunas veces tendrá que inferirse. Así como realizar una descripción en la actualidad que es después del depósito de jales y los cambios que haya provocado en el espacio ocupado por los mismos en el paisaje, la extensión del depósito, entre otros. Para analizar la interrelación entre el depósito de jales y el paisaje,

deben conocerse las características de la zona previas al depósito de jales, por lo que es importante entender las características morfológicas y los procesos interrumpidos por el depósito de los jales, así como sus interacciones con la hidrología. Esta información deberá incorporarse en la planificación de los trabajos de restauración. La descripción del paisaje incluye también conocer las características morfológicas, hidrológicas (i.e., lomeríos, barrancas, escurrimientos naturales, zonas de inundación), los tipos de suelo, la dirección de los vientos, los tipos de vegetación, entre otros factores del sitio donde se localizan los jales con las de la matriz del paisaje y sus relaciones espaciales (Bailey y Herzog, 2004; Bissonette, 2003; SER, 2019). Además, es importante conocer las interacciones de las comunidades bióticas con las actividades humanas (Valladares et al., 2011). Esta descripción incluye las interacciones a nivel de paisaje y las características y procesos en el sitio, ya que los materiales depositados interactúan con estos componentes a través de procesos naturales o humanos que ocurren en estos sitios (Rivera Castelo, 2009). Al ejecutar la EER a nivel del paisaje se deben identificar los ecosistemas de referencia o sitio de referencia que sirven para plantear una línea base y determinar las condiciones naturales a las que se busca llegar (Clewett y Aronson, 2013). Es decir, remanentes del ecosistema prístino, que mantengan las características y procesos ecológicos originales que se buscarán recuperar sobre los jales (SER, 2004). Además, la EER hace una valoración en corto tiempo del ecosistema, identificando sus atributos clave, interacciones como competencia y depredación, el establecimiento de especies invasoras, se identifican interacciones importantes entre los organismos como la que ocurre entre los hongos y las plantas (micorrizas), o la que sucede entre las plantas y los animales (herbivoría, frugivoría y granivoría) y que influyen en la dinámica de dispersión o depredación de semillas. Durante esta evaluación ecosistémica es necesario identificar las interacciones directas entre los organismos y los jales, ya que pueden implicar su afectación por los contaminantes contenidos en ellos e introducirlos a la cadena trófica (Baranowska et al., 2005; Tovar-Sánchez et al., 2012; Kiere et al., 2021). La evaluación del ecosistema permite establecer una línea de base para los trabajos de restauración (Bruns y Wiersma, 2004; Riitters y Tkacz, 2004). Este procedimiento puede

combinar el análisis de imágenes de percepción remota, colecciones de datos de campo y visualización de información espacial para planificar las estrategias de restauración (Walls, 1999; Siebe et al., 2016).

El impacto de la minería con la evaluación rápida a nivel de paisaje debe contemplar los cuatro aspectos propuestos por Kussmaul (1989): 1) el tamaño de la explotación, que se refiere a la superficie afectada por la extracción de los minerales y, de las zonas afectadas por actividades asociadas al proceso de transformación de los minerales en la zona, así como por la generación de desechos y de aguas residuales; 2) la localización geográfica del sitio donde se lleva a cabo la explotación; 3) los métodos de explotación, que dependen del tipo de yacimientos a explotar y que están directamente relacionados con la naturaleza y extensión del impacto de los desechos (Cuadro 2) y; 4) las características fisicoquímicas de los minerales extraídos, que pueden ser minerales metálicos, no metálicos o energéticos (INEGI, 2011); así como de las sustancias químicas utilizadas en el beneficio de los minerales, proceso por el que se obtienen los minerales adheridos a la roca (Nieto Ávila, 1997). En la descripción del paisaje es importante identificar las áreas afectadas en el ecosistema tanto por el depósito de los jales como por el arrastre de los materiales para mitigar su desplazamiento (Fig. 3). El conocimiento del arrastre de materiales permite identificar la movilidad de los materiales contaminantes debido a los escurrimientos naturales, pues tiene efectos adversos en ecosistemas aledaños (Saunders et al., 1993; Márquez-Huitzil, 2005). La EER a nivel local y paisajístico son complementarias para entender las interrelaciones del jal con el resto del entorno, así como las características ecológicas de los remanentes del ecosistema original (i.e., ecosistema de referencia).

A una escala local (fina), la EER debe considerar las características físicas, químicas y bióticas del depósito de jales, de los ecosistemas vecinos, zonas vecinas y asentamientos humanos. En cuanto a los jales, como se ha mencionado antes, es importante caracterizar su estructura, y la estabilidad de los materiales, el estado de las presas de jales (si las hay), evidencias de procesos de erosión laminar como surcos, cárcavas o exhumación de raíces, pendiente del terreno y escurrimientos (Rivera Castelo, 2009). La composición química de los jales es importante evaluarla y conviene tomar muestras a diferentes profundidades para ver la distribución



**Cuadro 2:** Tipos de explotación minera con su descripción y los métodos que involucra. Fuente: López Aburto, 1994.

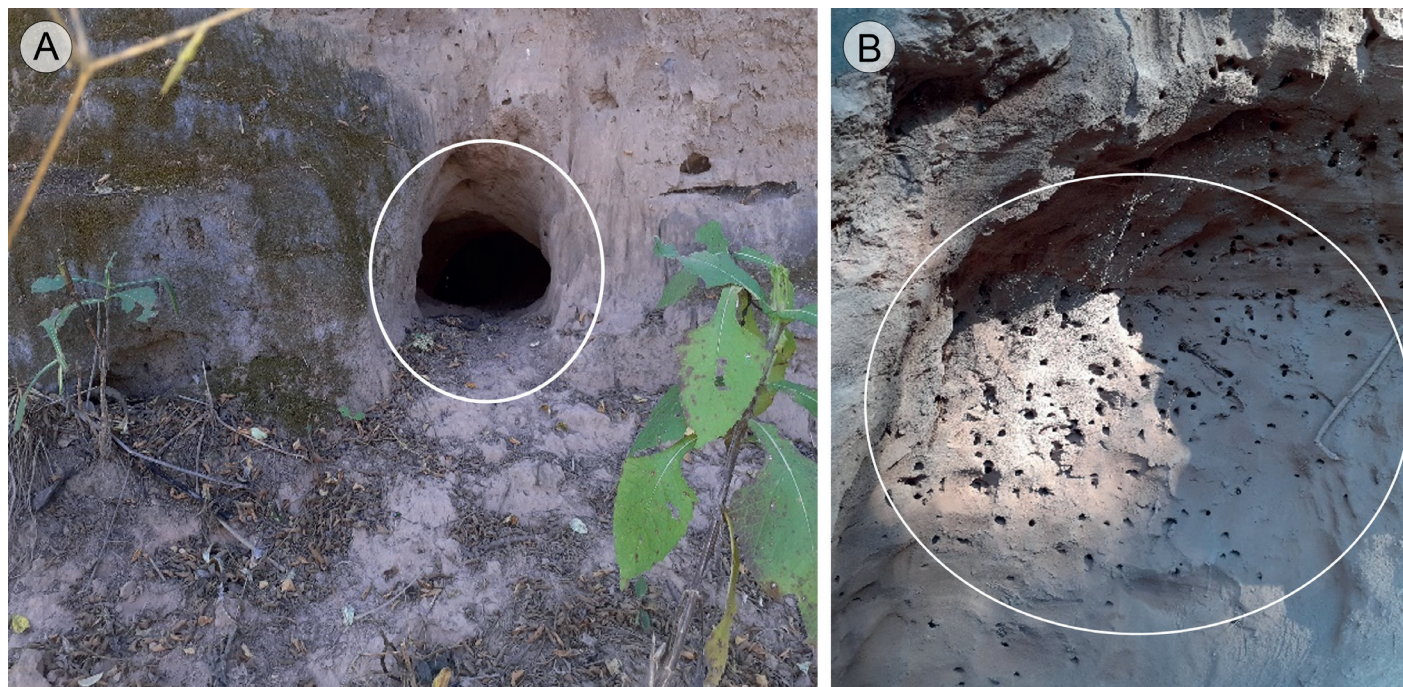
Tipo de explotación	Método de minado	Descripción	Materiales desechados
Minería superficial	Mina de placeres, tajo abierto (cielo abierto) o "Glory hole"	Excavación a cielo abierto destinada a la explotación de minerales metálicos o no metálicos, donde el mineral de interés está a menos de 160 m de profundidad. El tamaño de los depósitos varía de cientos a más de 100 millones de toneladas	Terreros y presa de jales
Minería subterránea	Rebajes naturalmente soportados Rebajes artificialmente soportados Rebajes de hundimiento Rebajes con métodos combinados	Utilizados para extraer minerales que se encuentran en las profundidades de la superficie de la tierra. Los minerales comunes que se extraen son el oro, el plomo y la plata. Una mina subterránea puede tener una profundidad de 300 m a 3 km	Terreros y presa de jales
Métodos especiales	Minado por soluciones (proceso "Frasch", disolución con agua caliente, lixiviación)	Son métodos especiales de minado subterráneo que emplean técnicas de disolución de los valores contenidos en el yacimiento. Estos métodos son utilizados cuando el mineral a obtener es soluble en algún tipo de medio acuoso	Terreros, lixiviados y presa de jales

de los contaminantes (MINAM, 2014; Montes Rocha, 2016). La presencia de sedimentos en suspensión en el agua o su acumulación cercana a los cauces, estos últimos indicarían el arrastre de los materiales (Gaitán et al., 2017). Tanto en los jales, en el ecosistema de referencia, como en áreas vecinas es necesario conocer la composición de las especies vegetales y animales (Keel et al., 2000), la diversidad biológica, y las principales interacciones entre los organismos (Young et al., 2000). El conocimiento de las interacciones entre especies vegetales establecidas en el jal con especies animales es importante para evaluar la introducción de los contaminantes en la cadena trófica (Skipin et al., 2016; Galván Ramírez, 2020). La evaluación ecológica rápida a escala local debe considerar la identificación de los organismos cuyo ámbito hogareño incluya la interacción con los jales (Esteves Aguilar, 2018; López Michelena, 2021) (Fig. 6). En un momento dado, también podrían ayudar a la colonización del sitio, ya que la visita de animales frugívoros permitirá la llegada de propágulos (de la Peña-Domene et al., 2014).

### (3) Planificar los tratamientos para el jal

La planificación es un aspecto fundamental en cada parte de la restauración. Tanto si se trata de la forma del depósito de jales o relaves mineros (Hustrulid et al., 2013; Puell Ortiz,

2017), hasta la aplicación de cada estrategia de mitigación como la remediación, la rehabilitación o la restauración; estas deben ir precedidas de una planificación (Fig. 5). Así mismo, debe existir una planificación de las técnicas de rehabilitación tanto a escala de paisaje (Buczyńska, 2020), como a escala local (Vick, 1990). La planificación permite obtener mejores resultados y realizar una evaluación de riesgo ecológico de la estrategia, antes de aplicarla (Trewick, 1999). Antes de seleccionar una técnica de mitigación en particular es importante realizar una evaluación de su posible impacto ecológico (Mandelik et al., 2005). Dado que algunas estrategias de mitigación involucran organismos vivos, estas pueden tener impactos colaterales no conocidos, como se ha demostrado en otros estudios (Simberloff y Stiling, 1996; Stromberg et al., 2009), además de que existe un porcentaje cercano a 11% del impacto de las especies introducidas sobre los ecosistemas (Simberloff et al., 2013) y, menor aún sobre su papel en la introducción de contaminantes en las cadenas tróficas locales. Cuando las estrategias de mitigación se relacionan con la restauración del ecosistema deben basarse en la guía internacional (Gann et al., 2019), que integra distintas herramientas, escalas e indicadores para la restauración en su planificación (Aguirre-Salado et al., 2017). Dado el amplio espectro de problemáticas a resol-



**Figura 6:** Interacción de algunas especies de fauna con los jales. A. madriguera de un organismo en los jales (círculo blanco) de Huautla, Morelos, México, posiblemente un mamífero; B. grupo de avispas excavando en los materiales del jal (círculo blanco) que, al momento de la foto presentaban un comportamiento errático al excavar (Foto: R. Márquez-Huitzil, 2021).

ver en la restauración ecológica de los depósitos de jales, se debe incluir un grupo multidisciplinario y objetivo para plantear las estrategias adecuadas al intervenirlos, coordinados con un enfoque de restauración del ecosistema (Márquez-Huitzil, 2005; Gann et al., 2019).

La planificación en la propuesta metodológica se sugiere realizarlo apoyado en el diagnóstico previamente descrito. La planificación es utilizada para seleccionar las técnicas de mitigación a ser aplicadas, después de evaluar y descartar cualquier riesgo potencial al ecosistema, sobre todo para aquellas técnicas que carecen de una evaluación de riesgo de impacto ecológico en el corto, mediano o largo plazo, o evitar su uso, en apego al Principio Precautorio (Anglés Hernández, 2018; Anglés Hernández et al., 2021). Después de esta evaluación se planifican las intervenciones y el monitoreo de estas. En base a las características del jal se planifica la reintroducción del componente biótico, el monitoreo de este y, en caso necesario, el manejo de las zonas intervenidas hasta llegar a características semejantes a las del ecosistema de referencia (Márquez-Huitzil, 1999; Gann et al., 2019). En

síntesis, los pasos lógicos en la planificación de un proyecto de restauración de jales serían los siguientes: 1) diagnóstico de la zona afectada, 2) selección y aplicación de estrategias de mitigación sin efectos colaterales a otros componentes del ecosistema (Simberloff y Stiling, 1996; Ewel et al., 1999; Louda y Stiling, 2004; Simberloff, 2012; Simberloff et al., 2013; Dickey et al., 2020), y 3) monitoreo que permite la adecuación de las intervenciones y de los tratamientos hasta lograr la autosuficiencia del ecosistema (SER, 2004, 2019; Márquez-Huitzil, 1999, 2005).

#### (4) Precauciones previas al uso de organismos o enmiendas de materia orgánica en jales contaminados

En esta metodología se recomienda que antes de implementar una estrategia de remediación o de rehabilitación que implique el uso de organismos vivos o de materia orgánica se evalúe el riesgo de un impacto ecológico (Fig. 5). La evaluación del impacto ecológico busca obtener información confiable y una interpretación de las implicaciones ecológicas de cualquier proyecto desde su inicio, durante su implemen-

tación y, hasta el término de este, ayudando a prevenir impactos negativos al ecosistema (EIANZ, 2015). La evaluación del impacto ecológico permitiría identificar si las técnicas implementadas tendrían efectos colaterales en el ecosistema como la creación de trampas ecológicas (Battin, 2004). Las especies o las enmiendas que sean utilizadas como biorremediadoras o como estabilizadoras de los materiales en los depósitos de jales conllevan distintos riesgos; cualquier especie utilizada como bioacumuladora es susceptible de ser depredada por las especies que se encuentran arriba en la cadena trófica, por tanto, existe un riesgo de que abran el camino a la red trófica (Martínez-Trinidad et al., 2013; Santoyo Martínez, 2016; De la Cruz Guarneros, 2018; Eissa y Negim, 2018; Ali y Khan, 2019; Díaz Alvarado et al., 2020; Muro González, 2020). Las especies también pueden hibridizarse con las especies nativas afectando su capacidad de bioacumulación y, si son depredadas por otras especies, habrá un incremento de EPT hacia arriba de la cadena trófica (Pivet, 2001).

A nivel ecosistémico, el uso de organismos o de enmiendas orgánicas para la remediación o para la estabilización de un sustrato contaminado con metales pesados puede atraer a otras especies, convirtiéndose en trampas ecológicas al resultar atractivo para los organismos (Severns, 2011; Fig. 5). Del mismo modo, independientemente del grupo taxonómico al que pertenezcan y si son especies nativas o exóticas, pueden convertirse en especies invasoras, causando daños ambientales, económicos y a la salud (Pivet, 2001; Levine, 2008; Ehrenfeld, 2010; Olenin et al., 2017). Esta observación también puede aplicarse a la presencia de los jales y a todas las zonas afectadas por la minería que presentan distintos niveles de degradación; así como a un depósito de jales que, por sus características, los materiales que lo forman pueden desplazarse a zonas aledañas, favoreciendo una invasión de estas (Gagnon et al., 2021). En cuanto a la invasión biológica, se debe tener en cuenta que no solo depende de la capacidad de la especie para invadir (invasividad), sino también de la presencia de un ecosistema degradado que puede ser invadido (invasibilidad; Barney y Whitlow, 2008). Por tanto, el uso de especies durante la remediación o la rehabilitación de los jales implica diversos riesgos sobre los jales y en los ecosistemas aledaños, que deberían de ser evaluados antes de introducirlas, ya que son sitios con materiales expuestos que interactúan con el ambiente y los ecosistemas.

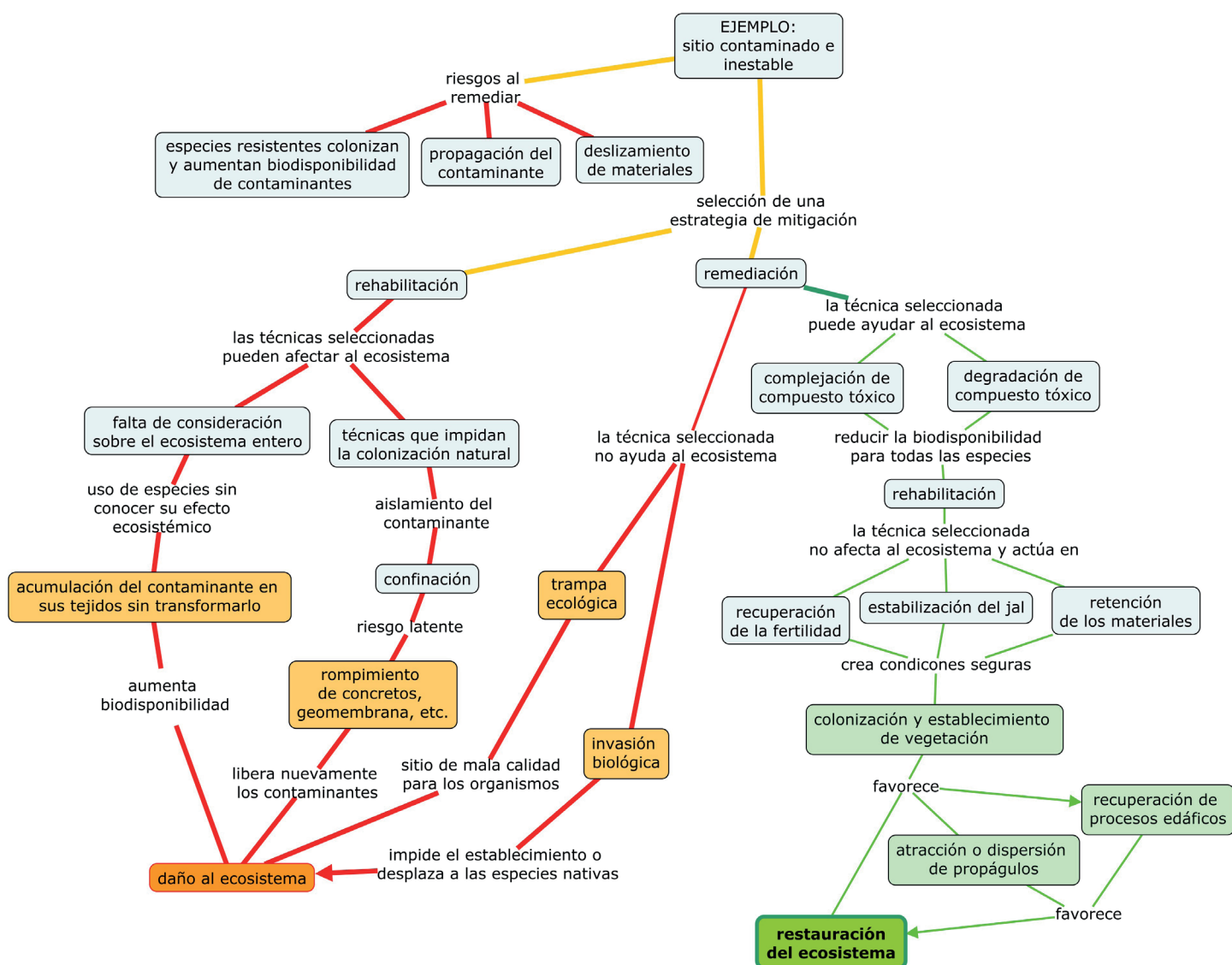
Por estos motivos, algunos autores sugieren que los estudios y los proyectos de mitigación deben realizarse con una perspectiva del ecosistema entero y evaluar los impactos colaterales de los tratamientos (Ewel, et al., 1999; Battin, 2004; Amezcua-Allieri y Rodríguez-Vázquez, 2008; Mazej et al., 2010; Ali et al., 2013; Goussen et al., 2016; Dickey et al., 2020; Oreja et al., 2020; Fig. 7). La presencia o ausencia de riesgo para los receptores ecológicos y la biodisponibilidad en un sitio deben ser evaluados cuando se considere utilizar alguna técnica que implique el uso de organismos vivos o de materiales de origen orgánico, aplicando la Evaluación de Riesgo Ecológico (ERE; Parisien et al., 2016).

En este trabajo se propone que, de acuerdo con el tipo de afectaciones y amenazas que provoca el jal, se seleccionen las técnicas de mitigación más adecuadas, pero apoyados en la ERE, descartando el uso de aquellas técnicas que puedan significar un riesgo de hacer biodisponibles los metales pesados para las especies que interactúen directa o indirectamente con el jal o bien a nivel ecosistémico (Fig. 6). Afortunadamente, existe toda una gama de técnicas de remediación (Volke et al., 2005; Meuser, 2013), y de rehabilitación (Meuser, 2013; Bolan et al., 2018), que pueden seleccionarse al mitigar los jales y que no implican el uso de organismos vivos o de materia orgánica, por lo que las técnicas seleccionadas no deben poner en riesgo los procesos naturales al generar contaminantes secundarios y microorganismos dañinos para el ecosistema (Sarkar et al., 2018; Fig. 7).

## (5) Definir los tratamientos

En el caso de la remediación existen distintas alternativas para el manejo de los contaminantes en los jales (Förstner et al., 2002). Estas pueden vincularse con el diseño de estrategias para prevenir el drenaje ácido, planificar su recorrido, o la contención de los materiales (Rivera Castelo, 2009; Pozo-Antonio et al., 2014; Ahumada Mexía, 2017). También es posible el tratamiento *in situ* de sitios contaminados con metales pesados mediante la inmovilización de estos, utilizando métodos físicos o químicos, donde los contaminantes son estabilizados, solidificados o contenidos evitando que sean atractivos como alimento para los organismos (Martin y Ruby, 2003; Volke et al., 2005). El uso de algunos tipos de enmiendas, como las zeolitas o los compostos ricos en hierro se combinan con los metales pesa-





**Figura 7:** Rutas que pueden seguirse para la mitigación de un jal minero considerando los criterios de una restauración ecológica. Las flechas en amarillo indican las estrategias de mitigación para mitigar un jal contaminado con metales pesados. Las flechas azules indican las técnicas que pueden seguir la remediación y la rehabilitación, así como los caminos que pueden seguir después de aplicarlas. Las flechas rojas indican los efectos negativos que puede tener la selección de algunas técnicas de remediación o de rehabilitación si hacen biodisponibles los metales pesados. Las flechas verdes indican la selección adecuada de una estrategia de mitigación en el camino de una restauración ecológica, eliminando los contaminantes, estabilizando los jales y rehabilitando los suelos, pero sin hacer biodisponibles a los metales pesados. Obsérvese que, el uso de la fitorremediación puede conducir hacia la restauración, si se realiza una Evaluación de Riesgo.

dos, provocando una reacción denominada complejación, transformándolos a formas no biodisponibles (Curi et al., 2006; Gadepalle et al., 2007), resaltando que no todas las enmiendas propician esta complejación. Otras estrategias de remediación utilizadas para remover los metales pesados son: 1) la electroremediación, 2) el lavado de suelos (técnica *ex situ*) y, 3) el uso de compuestos inorgánicos que reduce los impactos sobre la flora y la fauna en el corto o largo plazo (Curi et al., 2006; Lim et al., 2013). En cualquier

caso, cuando se aplique una estrategia de remediación, antes debe realizarse una ERE para evitar posibles efectos colaterales sobre el ecosistema.

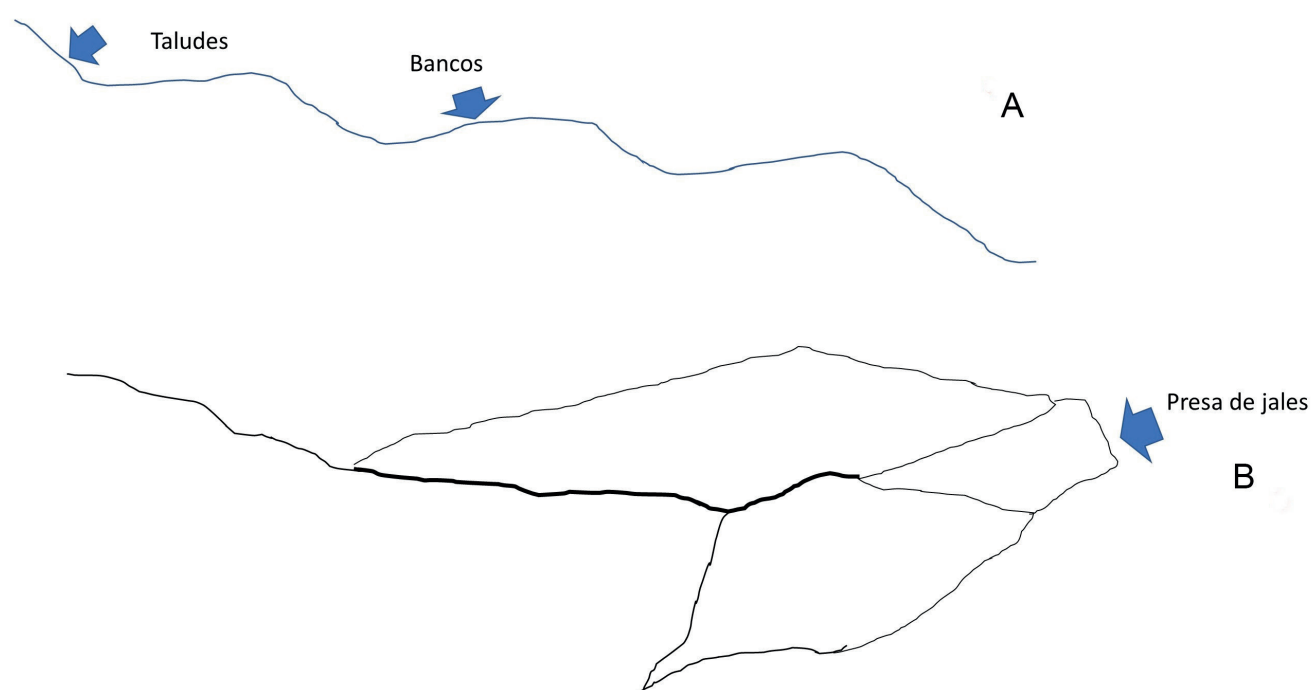
Un problema adicional a la toxicidad de los jales es la inestabilidad de los materiales del jal como tecnosuelo. Para lograr este fin, existen distintas técnicas de rehabilitación. Entre las estrategias de estabilización del terreno están: 1) aquellas que consideran la modificación a la estructura del jal, como la creación de terrazas y taludes de

poca inclinación que se ha realizado en algunos sitios afectados por la minería (Márquez-Huitzil, 1999; Rivera Castelo, 2009; Fig. 8A); 2) las relacionadas con el control de los escurrimientos, como la construcción de canales para desagüe (Rivera Castelo, 2009); 3) el control del arrastre de los materiales mediante la construcción de presas, diques o el uso de otros elementos para contener o frenar el movimiento de materiales (Cardoza et al., 2007; Loredó-Ostí et al., 2007; Meza-Figueroa et al., 2009; Fig. 9A-C); 4) el confinamiento de los materiales es otra opción, pero representa un riesgo si las estructuras contenedoras no son herméticas o si sufren un deterioro que las fracture, provocando fugas o creando el riesgo de movimientos en masa (Rivera Castelo, 2009; Garduño Sanabria, 2013; Sánchez-Núñez et al., 2015; Fig. 8B). Otros elementos para prevenir la movilización de los materiales por agua o aire son las geomallas, presas de gaviones, la creación de bordos o zanjas y el uso de acolchados, entre otros (Rivera Castelo, 2009; Gerencia de Restauración Forestal, 2018; Fig. 9). Ahumada Mexía (2017) considera que estos materiales deben ser confinados, aunque esta estrategia no termina con el problema y se corre el riesgo de que los mecanismos

de confinamiento no sean efectivos a largo plazo. En resumen, existe una infinidad de estrategias para estabilizar los jales ante los procesos naturales de arrastre de materiales, los cuales son complementarios al control de su toxicidad y debido a la existencia frecuente de depósitos de jales inestables, pueden utilizarse antes de la remediación.

## (6) Aplicación de tratamientos

Para evitar el desplazamiento de los jales, primero podrían estabilizarse los materiales mediante técnicas de rehabilitación, como construcción de presas o modificación a la estructura del sitio. La aplicación de estas estrategias es de acuerdo con el principio nueve planteado por la Sociedad para la Restauración Ecológica que dice que la restauración ecológica es parte de un Continuo de Actividades Restaurativas (Gann et al., 2019). En este caso, las técnicas de remediación se utilizan para controlar la biodisponibilidad de los tóxicos; posteriormente, se incorporan técnicas de rehabilitación de suelos para incrementar su fertilidad y favorecer la colonización por plantas (Fig. 3; Brown et al., 1986; Naidu et al., 2008; Meuser, 2013). La rehabilitación recupera parte del funcionamiento del ecosistema y algunos servicios ecosistémicos.



**Figura 8:** Ejemplo de técnica de estabilización de taludes y de contención. A. diseño en taludes y bancos; B. contención con una presa de jales.



**Figura 9:** Estrategias para el control del desplazamiento de materiales e infiltración. A. zanjas a contorno; B. presa de gavión; C. presa de geocostales (Fotos: R. Márquez-Huitzil, 2021).

micos (SER, 2019). Incorporada a la restauración ecológica pueden seleccionarse algunas técnicas de estabilización de suelos, control de la erosión, ordenar los escurrimientos y recuperar la productividad de los suelos (Brown et al., 1986). El uso de organismos o de materiales orgánicos se propone que se emplee solo después de comprobar que el sitio no representa un riesgo de convertirse en una trampa ecológica. En cuanto a la vegetación del jal, se propone seleccionar especies vegetales nativas que crezcan y se desarrollen bajo las características fisicoquímicas y mineralógicas de los jales descontaminados, recordando que se trata de un tecnosuelo, donde la textura y propiedades pueden diferir de los suelos originales del sitio donde son depositados (Baghdad et al., 2006; Valdez-Hernández et al., 2019). Adicionalmente, las especies vegetales nativas utilizadas deben encontrarse dentro de su área de distribución natural u original (histórica) y formen parte de las comunidades bióticas naturales del área de acuerdo con su potencial de dispersión natural (CONABIO, 2010).

El diagnóstico ayuda a detectar el grado de estabilidad del sitio, el nivel de toxicidad que presenta, y el movimiento

de los materiales. Esto permite elegir el orden en que las medidas de estabilización, contención o remediación requieren aplicarse (SEMARNAT, 2004, 2011). En este caso se propone que el depósito de jales se maneje como otro componente del ecosistema, buscando que se integre al funcionamiento del paisaje. Esto involucraría manejar la estructura del depósito en equivalencia a una geoforma, considerando su posición en el paisaje, los escurrimientos presentes y canales (si se crearon) para el drenaje que equivaldrían a la hidrología, el tipo de tecnosuelo tratarlo de acuerdo con la forma como se haya rehabilitado y por sus propiedades.

Se sugiere que la rehabilitación para la recuperación de la fertilidad de los suelos se busque después que hayan sido controlados los metales pesados y las sustancias tóxicas y se presenten por debajo de los límites máximos permisibles, para evitar la posibilidad de crear trampas ecológicas. Los organismos del suelo juegan un papel fundamental en la restauración de los ecosistemas afectados por la minería, ya que permiten recuperar la función del suelo o las interacciones bióticas de los organismos (Fragoso y Rojas, 2012; Cross et al., 2020). Una vez que los ja-



les no representan un riesgo para la biota por su toxicidad, recomendamos crear condiciones de fertilidad en ellos, dependiendo de las características edáficas originales y del ecosistema de referencia (p. ej., árido, templado, tropical). El uso de micorrizas, en especial las arbusculares, tiene un efecto importante en el crecimiento de las plantas en sitios en recuperación y también favorecen la retención de las partículas de suelo en ecosistemas desertificados (Álvarez Sánchez, 2009; Palenzuela y Barea, 2009; Carrillo-Saucedo et al., 2022). Si las condiciones originales de la zona presentan suelos fértiles, entonces, mediante técnicas de rehabilitación de suelos pueden modificarse las características superficiales de los materiales e incrementar la fertilidad a través de la introducción de enmiendas (Dafana et al., 2010), o mediante transposición de porciones superficiales de suelos desde sitios remanentes conservados (Ceccon, 2013).

Las estrategias que pueden utilizarse para la recuperación de las comunidades bióticas pueden seguir distintas alternativas. Algunos autores mencionan que existen al menos tres grados de intervención en la restauración (Martínez-Garza et al., 2016; Christmann y Oliveras Menor, 2021): a) intervención mínima, por ejemplo, permitir la regeneración natural o bien excluir el agente que provoca la degradación del sitio; b) nivel intermedio de intervención o regeneración asistida, lo que puede involucrar la siembra directa, la remoción de especies competidoras, intervenciones que involucren el uso de acolchados, o el manejo de especies invasoras y c) máxima intervención o restauración activa como el establecimiento de plantaciones de especies nativas. En los dos últimos niveles puede propiciarse la atracción de fauna, entre la que se encuentran muchas especies dispersoras (Hernández-Galindo, 2016). La adición de composta o materia orgánica, así como el trasplante de suelos, son otras estrategias que pueden implementarse para dirigir la rehabilitación del jal hacia una restauración (Ceccon, 2013). Este tipo de estrategias busca favorecer la colonización de plantas y la llegada de organismos de todos los grupos hacia el jal, incluyendo la microfauna edáfica que interviene en los procesos de formación de suelos, pero resaltamos que deben implementarse en sitios libres de contaminantes. Los acolchados formados con materiales orgánicos es otra estrategia para aumentar la fertilidad

de los materiales ya que mantienen la humedad del suelo y previenen la pérdida de partículas por el desplazamiento provocado por la lluvia o el viento (Barajas, 2007). Adicionalmente, en esta fase, puede aprovecharse el potencial estabilizador de las plantas (Pineda Juárez, 2018). Existen distintas técnicas de rehabilitación de suelos aplicables a los materiales contenidos en los jales que pueden favorecer la colonización de plantas, ya que, finalmente, los jales provienen de la roca madre, parte de la matriz edáfica.

Si no se cuenta con apoyo para los trabajos de restauración, es posible utilizar estrategias para promover la movilización y colonización natural de germoplasma hacia un sitio (Hernández-Galindo, 2016). Para decidir si un sitio tiene las condiciones necesarias para favorecer la intervención mínima de restauración (p. ej., regeneración natural), se puede evaluar el potencial de regeneración natural con variables abióticas (p. ej., suelo, precipitación, temperatura), asociadas al disturbio (p. ej., tamaño, severidad, duración) e incluso sociales (p. ej., índice de desarrollo; Martínez-Garza et al., 2021). Además, paralelo a las plantaciones hay otras estrategias como la formación de grupos de Anderson (Ceccon, 2013), la nucleación (Zahawi et al., 2013), el uso de comunidades sintéticas (Mendoza, 2013), el uso de perchas artificiales (Rubiano Guzmán, 2016), que requieren una menor inversión de tiempo y esfuerzo con buenos resultados, aunque a un mayor plazo, dependiendo de las características ambientales del sitio. El uso de plantas nodrizas favorece el establecimiento de otras plantas nativas (Palenzuela y Barea, 2009), al tiempo que atraen propágulos, insectos, dispersores de semillas y animales insectívoros (Martínez-Garza et al., 2016). En algunos jales puede ocurrir una colonización espontánea de vegetación por lo que conviene monitorearla a lo largo del tiempo y, posiblemente, eliminar a las especies que lo colonicen para evitar el ingreso de los metales pesados a la cadena trófica a través de estas (Santoyo Martínez, 2016; Chen et al., 2019). La restauración ecológica consiste en los trabajos prácticos para recuperar un ecosistema, pero también puede generar conocimiento de la siguiente forma: sistematizando los tratamientos, infiriendo acerca de las causas y efectos del éxito o fracaso de un procedimiento y, considerando las distintas escalas de comunidad, paisaje y ecosistema (Howe y Martínez-Garza, 2014).

## (7) Monitoreo

Los trabajos de restauración deben monitorearse considerando algunos criterios: a) el monitoreo debe ser transparente, y una evaluación y un manejo adaptativo son componentes integrales que pueden utilizarse de forma complementaria entre sí, durante el proceso de restauración; b) esta evaluación debe apoyar metas flexibles, que, más que ser objetivos estáticos de la restauración del ecosistema, podrían modificarse de acuerdo con las condiciones que se van generando; c) un monitoreo efectivo y una adecuada evaluación requieren de una línea base para determinar el progreso de las acciones y tratamientos; d) los criterios de seguimiento dependen del contexto, particularmente cuando se considera todo el espectro de ecosistemas (Science Task Force for the UN Decade on Ecosystem Restoration, 2021). Cualquier estrategia utilizada en el continuo restaurativo requiere de un monitoreo constante, ya que podría requerir de un manejo de modo iterativo. En el caso de la restauración, el seguimiento del área intervenida es necesario hasta lograr la autosuficiencia del ecosistema (Márquez Huitzil, 1999; Gann et al., 2019). El monitoreo es indispensable para prevenir cambios en la toxicidad potencial del suelo (Oreja et al., 2020). La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (Science Task Force for the UN Decade on Ecosystem Restoration, 2021) resalta algunos criterios importantes para tomar en cuenta durante el monitoreo de los proyectos de restauración. La falta de monitoreo y la investigación posterior a la restauración han significado pocas oportunidades para mejorar la teoría y la práctica de la restauración ecológica en la minería (Cooke y Johnson, 2002). El monitoreo de las zonas rehabilitadas tiene varias ventajas (Turrión et al., 2021): i) permite evaluar la efectividad de las técnicas implementadas; ii) facilita detectar estados críticos que pueden comprometer el éxito en la restauración y, establecer medidas correctivas de ser necesario; iii) cuantifica objetivamente la recuperación de los servicios ecosistémicos al área restaurada. Cualquier método utilizado requiere de un seguimiento y un mantenimiento adecuado a largo plazo para garantizar su rendimiento (Xiong, et al., 2018). El monitoreo de la restauración debe contrastarse con metas y objetivos claros, mediante el uso de indicadores medibles (Gann et al., 2019). En otros sitios afectados por la minería, se ha observado que es ne-

cesario establecer un sistema efectivo de monitoreo que permita conocer el estado y las tendencias de los indicadores seleccionados y ayude a identificar la necesidad de realizar acciones y modificaciones en los trabajos de restauración (Turrión et al., 2021).

Dentro de las metas para la restauración de los jales proponemos un seguimiento de la presencia de EPT (Elementos Potencialmente Tóxicos), de la estabilidad y del desplazamiento de los materiales. En el caso de los EPT, proponemos que se midan tanto en los materiales como en las plantas que se establezcan en el sitio (Hernández-Acosta et al., 2009), aún después de remediar los jales, ya que las plantas, a través de su sistema radicular, podrían acceder a contaminantes de las partes profundas del jal y son un eslabón con otros organismos en la cadena trófica (Rebollo-Salinas, 2019). El transporte de los EPT desde los jales hacia su vecindad es otro aspecto de importancia que se tiene que monitorear, sobre todo en jales que se encuentren en climas que favorecen su dispersión por viento o por agua (Corrales-Pérez y Romero, 2013; Esteller et al., 2015; Kiere et al., 2021). Eventualmente los EPT ocasionan daños a los ecosistemas desde el momento en que los jales son depositados (Dávila Luna et al., 2018). Del mismo modo, es importante dar seguimiento a la estabilidad de los materiales. Un análisis de los accidentes en minas a cielo abierto ha revelado que las fallas en taludes y tiraderos presentan una tendencia a la alza (Chaulya y Prasad, 2016). Para el monitoreo de la estabilidad pueden aplicarse metodologías que predicen la vulnerabilidad a los movimientos de ladera en función del tipo de materiales, la pendiente y la precipitación, entre otros factores (Alcántara Ayala, 2000; Garduño Sanabria, 2013; Chaulya y Prasad, 2016). Del mismo modo es importante dar seguimiento al monitoreo de la estabilidad de los materiales y ante procesos graduales de erosión (RUSLE, por sus siglas en inglés). En este caso particular se puede emplear el indicador de la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo para que calcule la pérdida de suelo de manera directa (FAO, 2019), o también puede calcularse mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (Kim et al., 2012; Suh et al., 2017). Por estos motivos, es necesario desarrollar estrategias para identificar aquellos sitios que representen un peligro por la dispersión de los contaminantes desde los jales hacia el ambiente y

desarrollar estrategias para evaluar su riesgo (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006), así como por la inestabilidad de los propios depósitos de jales.

En cuanto a los objetivos de la restauración del ecosistema, los indicadores seleccionados deben considerar a los distintos grupos de organismos en la recuperación del ecosistema (Fragoso y Rojas, 2012). Realizar un seguimiento a la sucesión ecológica y la recuperación de la biodiversidad resulta indispensable, pues es la meta final de la restauración ecológica, ya que los jales, al encontrarse en una matriz de interacciones ambientales e interactuar con distintas especies en el paisaje, pueden seguir distintas rutas durante la sucesión (Hustrulid et al., 2013; Parraga-Aguado et al., 2013). Por otro lado, en la restauración, el objetivo es recuperar un ecosistema semejante al original (Bradshaw, 1983; Jordan III et al., 1987; Gann et al., 2019). Para dirigir el proceso de sucesión en los jales se recomienda el monitoreo del ecosistema de referencia o modelo y que, de ser necesario, el proceso de restauración sea un proceso iterativo de corrección continua. Después de la remediación y la rehabilitación es conveniente monitorear la vegetación en los jales, independientemente de su origen (i.e., plantada o reclutada naturalmente). Para ello es importante identificar el origen de la especie (nativa o exótica), su sobrevivencia, síndrome de dispersión, tipo de frutos (Bejarano-Castillo y Guevara, 2008) y propagación en el área, lo que permitirá hacer predicciones sobre la recuperación natural y eliminar a la vegetación potencialmente invasora o a la exótica del sitio (Márquez Huitzil, 1999; Castillo-Campos y Juárez, 2012). En este caso, el uso de cuadros permanentes de muestreo para vegetación puede ser de gran utilidad (Márquez Huitzil, 1999; Gallaga y Juárez, 2012). El monitoreo de la vegetación también debe hacerse en el ecosistema de referencia y en un área degradada no intervenida, para observar la recuperación en la estructura y composición florística en los jales (Márquez Huitzil, 1999; Castillo-Campos y Juárez, 2012; Gann et al., 2019). Para evaluar el progreso en la recuperación de la estructura de la comunidad, se puede utilizar el Índice de Similitud de Jaccard que ya ha sido utilizado para dar seguimiento a la revegetación de minas de roca caliza y a otros estudios de restauración (Márquez Huitzil, 1999; Smith-Ramírez et al., 2011; Castillo-Campos y Juárez, 2012; López-Barrera et al., 2016). Los muestreos

periódicos de especies son un factor de gran importancia para determinar la presencia de especies nativas y eliminar a las invasoras, por lo que se debe identificar, contar y medir sistemáticamente a la vegetación presente comparando con la referencia ecológica, evitando también que la sucesión tome un camino distinto a esta (Márquez Huitzil, 1999; Gallaga y Juárez, 2012; Turrión et al., 2021; Science Task Force for the UN Decade on Ecosystem Restoration, 2021). Además, se debe registrar la sobrevivencia, el diámetro y la altura durante al menos los primeros dos años, ya que estas mediciones pueden predecir el desempeño a mediano plazo (Martínez-Garza et al., 2016). Los monitoreos deben registrar la estructura, el comportamiento y el papel ecológico de las distintas especies que colonicen el sitio, así como el retorno de comunidades faunísticas funcionales, resilientes y biodiversas relacionadas con los paisajes restaurados después de la minería y su seguimiento debe ampliarse hacia un examen holístico (Cross et al., 2021).

## Discusión

La problemática ambiental y los impactos a los ecosistemas por las actividades humanas resultan ser factores mucho más complejos y variados que las soluciones planteadas y ampliamente difundidas (Bourgeron et al., 2018). En la literatura referente a problemas ambientales se encuentran gran cantidad de propuestas para resolverlos, pero la gran mayoría lo reducen a una sola solución, sin considerar al ecosistema como un sistema complejo en el que se aplicarán dichas soluciones, como en el caso de la contaminación o de las especies invasoras; esto provoca que no haya una evaluación de los efectos colaterales que la propia solución podría tener sobre otros componentes de los ecosistemas (Louda et al., 2003; Louda y Stiling, 2004; Zaller y Brühl, 2019). Las soluciones planteadas muchas veces no resuelven completamente el problema porque no se abarca la problemática de forma integral (Simberloff y Stiling, 1996; Stromberg et al., 2009; Goussen et al., 2016; Gann et al., 2019). Tomando como base el modelo de Bradshaw (1983) y los principios de Gann et al. (2019), la aplicación aislada de una estrategia de remediación o de rehabilitación sin buscar la estructura y funcionalidad originales del ecosistema, puede impedir lograr su restauración y llevar al sistema en sentido opuesto.



Goussen et al. (2016) resaltan que la mayoría de los estudios y proyectos relacionados con el ambiente se limitan a reducir los problemas a unas cuantas causas de esta compleja problemática y sus efectos sobre el ecosistema. En el caso de los jales mineros, la mayor parte atiende solo a la contaminación producida por estos (Pérez et al., 2021), y la solución, por lo regular, se enfoca al uso de la biorremediación por ser la estrategia de menor costo y que requiere menor esfuerzo en su implementación (Lasat, 1999; Mench et al., 2010; Parraga-Aguado et al., 2013; Tózsér et al., 2017; Chen et al., 2019). Resulta preocupante que algunos investigadores sugieran que “Latinoamérica al ser tan diversa tiene un gran potencial para utilizar las especies como bioacumuladoras” (Guerra Sierra et al., 2021). No obstante, como se mencionó anteriormente, no se estudian las interacciones del propio tratamiento sobre otros componentes del ecosistema (van Riper III et al., 2008). En esta revisión se resalta que tanto el depósito de jales mineros como la creación de minas a cielo abierto provocan una problemática compleja por la interacción de esos materiales con todos los fenómenos naturales y las variadas interacciones dentro de los ecosistemas. Como se expuso, las soluciones sencillas a problemas complejos no son la mejor opción para recuperar o crear condiciones semejantes a los ecosistemas que se formaron en miles de años y pueden generarse nuevos problemas. La metodología propuesta en esta revisión es integrar distintas técnicas y procedimientos de diversos autores. Se enfatiza, por una parte, la importancia del orden y la selección de las estrategias para planificar el trabajo de restauración de los jales. Tanto al seleccionar las técnicas de remediación y rehabilitación como al momento de aplicarlas no debe existir un riesgo de biodisponibilidad para los organismos nativos, ni deben crearse trampas ecológicas con otros niveles de impacto ecológico, exponiendo los motivos en el documento. Por otra parte, un enfoque de restauración ecológica tendría como meta que los sitios ocupados por el depósito de jales se integren al ecosistema ofreciendo hábitats de calidad para la flora y la fauna y que, además, aporten servicios ecosistémicos para todas las especies, incluido el ser humano.

## Implicaciones

La mitigación con una orientación a la restauración ecológica de los impactos provocados por los jales mineros, permitiría

integrarlos en el paisaje como parte del ecosistema una vez controlados los elementos tóxicos. Existen numerosos trabajos enfocados solo al uso de especies vegetales tolerantes a concentraciones altas de contaminantes o de enmiendas en minas y jales con especies que pueden extraer o acumular metales pesados, pero que no consideran el impacto sobre otros organismos (Hossner y Hons, 1992; González-Chávez, 2005; Dafana et al., 2010; Lottermoser, 2010; Ortega-Larrocce et al., 2010; Kabas et al., 2011; Nyakudya et al., 2011; Parraga-Aguado et al., 2013; Al-Lami et al., 2019; Oreja et al., 2020; Santoyo-Martínez et al., 2020). En ambos casos, pocas veces se considera el efecto de las plantas sobre la biota nativa de la zona o sobre las especies domesticadas por el hombre que pudieran visitar los jales (Ali et al., 2013; Sánchez-López et al., 2015; Rebollo-Salinas, 2019; Oreja et al., 2020). Por otra parte, distintos estudios han resaltado la importancia de no establecer relaciones uno a uno en la resolución de los problemas ambientales, sino considerar los distintos factores medioambientales involucrados al interactuar con los ecosistemas (Graf et al., 2002; Louda y Stiling, 2004; Stromberg et al., 2009). La falta de estudios que den una continuidad a los tratamientos de mitigación, y/o evalúen sus efectos colaterales, deja abierta la posibilidad de que las especies utilizadas solo para remediar o solo para rehabilitar, sin un control posterior, favorezcan la creación de trampas ecológicas, afectando a otras especies.

## Conclusiones

La resolución de los problemas generados por los jales debe tener un enfoque multifactorial y multivariado, en donde se involucren todas las interacciones posibles entre los factores. Como esto es poco factible en la realidad, entonces hay que seleccionar los tratamientos que conlleven el menor riesgo posible. La presente propuesta ofrece alternativas para sitios afectados por la minería y actividades involucradas en la misma, pero no significa que sea la solución para los casos presentados en las distintas condiciones donde existen jales mineros, o para cualquier tipo de impactos mineros o un pretexto para justificar una “minería sustentable”, porque, en la actualidad, ya no la hay. Esta propuesta incorpora parte de las alternativas que pueden seguirse en la búsqueda de mitigar los impactos provocadas por una minería mal regulada jurídica y técnicamente

deficiente en el aspecto ambiental, pues un ecosistema restaurado nunca será igual al ecosistema original. Existen pocos estudios, pero no por eso despreciables, de cómo una solución para un problema ambiental puede conllevar efectos ecosistémicos colaterales si no se incorpora un mayor número de variables al estudio. Con base en los impactos anteriormente descritos, los aspectos que cubre cada estrategia de mitigación y un trabajo de análisis y síntesis sobre los impactos colaterales que puede tener la selección de una estrategia inadecuada, como ha ocurrido en otros campos de la investigación que utilizan organismos vivos para resolver problemas ambientales generados por las actividades humanas (Louda et al., 2003; Louda y Stiling, 2004; Stromberg et al., 2009), se propone que las estrategias de mitigación se enfoquen a 1) la remediación de los metales pesados o elementos potencialmente tóxicos en los jales, 2) la estabilización de los depósitos en los jales, 3) la rehabilitación de los materiales (jales) que sean tratados como suelos, y 4) la colonización y sucesión por plantas nativas. Restaurar un ecosistema no garantiza que los procesos dentro del mismo se mantendrán en el largo plazo sin retroceso y, mucho menos, si se toman en cuenta los grandes cambios que sufre el planeta por los impactos de las actividades humanas a distintas escalas (i.e., cambio climático, la urbanización acelerada, la minería, entre otros; Özyavuz, 2012; Dawoudian, 2021; Wang et al., 2021). Por lo que recomendamos evitar el uso de organismos o materiales orgánicos hasta remediar los contaminantes, evitando crear trampas ecológicas. Proponemos una metodología para lograr estos objetivos. Así como realizar el monitoreo de los metales pesados y del restablecimiento de la comunidad vegetal en los jales a lo largo de toda la mitigación. El potencial de restauración ecológica nunca debe invocarse como una justificación para destruir o dañar a los ecosistemas nativos existentes o para el uso insostenible de los recursos naturales (SER, 2019).

## Contribución de autores

RMH propuso la idea del contenido original, diseño del artículo, compilación de información, escritura, preparación del primer manuscrito y correcciones del documento. CMG y MOB realizaron la revisión crítica del manuscrito original, modificaciones a la estructura, redacción, conte-

nido, aportación de información para enriquecer el contenido y correcciones del documento.

## Financiamiento

RMH agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca número 778992, para realizar estudios de Doctorado.

## Agradecimientos

RMH agradece al CONACyT y al Doctorado en Ciencias Naturales de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) y a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por facilitar el acceso a gran parte de la literatura para este trabajo, a Lynna Kiere por compartir su preocupación sobre las trampas ecológicas creadas con la fitorremediación en los jales de Huautla, Morelos; a Meztli Méndez Méndez por el apoyo en las correcciones y aclaración de ideas en el artículo; al grupo de Editores de la revista *Acta Botánica Mexicana* cuya paciencia en la revisión y valiosas recomendaciones ayudaron a mejorar significativamente el presente escrito; a Sergio Guevara Sada por permitirle el asesoramiento en los inicios de la Restauración en la cantera Cuautlapan de APASCO (HOLCIM®) que creó en RHM la inquietud por esta área.

## Literatura citada

- Aguirre-Salado, C. A., L. Miranda-Aragón, M. Pompa-García, H. Reyes-Hernández, C. Soubervielle-Montalvo, J. A. Flores-Cano y H. Méndez-Cortés. 2017. Improving Identification of Areas for Ecological Restoration for Conservation by Integrating USLE and MCDA in a GIS-Environment: A Pilot Study in a Priority Region Northern Mexico. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6(9): 262. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi6090262>
- Ahumada Mexía, R. 2017. Identificación de residuos tóxicos mineros por percepción remota y su verificación geoquímica en El Triunfo (BCS): propuesta metodológica para priorizar acciones de restauración. Centro interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional. La Paz, México. 71 pp.
- Al-Lami, M. K., N. Oustriere, E. Gonzales y J. G. Burken. 2019. Amendment-assisted revegetation of mine tailings: improvement of tailings quality and biomass production.

- International Journal of Phytoremediation 21(5): 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1537249>
- Alcántara Ayala, I. 2000. Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. Investigaciones Geográficas 41: 7-25. DOI: <https://doi.org/10.14350/rig.59101>
- Ali, H. y E. Khan. 2019. Trophic transfer, bioaccumulation, and biomagnification of nonessential hazardous heavy metals and metalloids in food chains/webs-Concepts and implications for wildlife and human health. Human and Ecological Risk Assessment 25(6): 1353-1376. DOI: <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1469398>
- Ali, H., E. Khan y M. A. Sajad. 2013. Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications. Chemosphere 91(7): 869-881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Álvarez Sánchez, F. J. (ed.). 2009. Ecología de micorrizas arbusculares y restauración de ecosistemas. Las Prensas de Ciencias. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F., México. 361 pp.
- Ambrocio Rosales, E. L. 2017. Uso de residuos mineros como relleno en minas subterráneas y criterios para un marco regulatorio. Tesis de Ingeniería de Minas y Metalurgista. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Cd. Mx., México. 96 pp.
- Amezcuza-Allieri, M. y R. Rodríguez-Vázquez. 2008. Impact on metal bioavailability and plant uptake during the bioremediation of a phenanthrene-contaminated soil. Terra Latinoamericana 26(4): 351-359.
- Anglés Hernández, M. 2018. El principio precautorio en México; plaguicidas, medio ambiente y salud. In: Chan, S., F. Ibarra Palafox y M. J. Medina Arellano (coords.). Bioética y Bioderecho. Reflexiones clásicas y nuevos desafíos. Universidad Nacional Autónoma de México - Instituto de Investigaciones Jurídicas. Cd. Mx., México. Pp. 439-459.
- Anglés Hernández, M., M. Rovalo Otero y M. Tejado Gallegos. 2021. Manual de Derecho Ambiental Mexicano. Instituto de Investigaciones Jurídicas, Universidad Nacional Autónoma de México. Cd. Mx., México. 235 pp.
- Annable, M. D., M. Teodorescu, P. Hlavinec y L. Diels (eds.). 2020. Methods and Techniques for Cleaning-up Contaminated Sites. NATO Science for Peace and Security Programme. Springer. Dordrecht, The Netherlands. 196 pp. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6875-1>
- Armendáriz, E. J. 2016. Áreas Naturales Protegidas y Minería en México: Perspectivas y Recomendaciones. Tesis de doctorado en ciencias (orientación ecología). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, Baja California, México. 165 pp.
- Azamar Alonso, A., L. Merino Pérez, C. Navarro González y J. Peláez Padilla. 2021. Así se ve la minería en México. Primera edición. Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Desarrollo Institucional, Universidad Iberoamericana, Fundación Heinrich Böll. Cd. Mx., México. 113 pp.
- Baghdad, B., M. Naimi, A. Bouabdli, P. Sonnet y S. Lutts. 2006. Heavy metals in tailings, soils and vegetation of an abandoned lead mine land in Morocco. Ecologia Mediterranea 32: 85-91. DOI: <https://doi.org/10.3406/ecmed.2006.1421>
- Bailey, D. y F. Herzog. 2004. Landscape Monitoring. In: Wiersma, G. B. (ed.). Environmental Monitoring. CRC Press. Boca Raton, USA. Pp. 307-335. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203495476>
- Barajas, G. 2007. Estrategias de reforestación en selvas bajas caducifolias: Influencia del uso de acolchados en el establecimiento, sobrevivencia y crecimiento de plantas de especies nativas. Tesis de Doctorado en Ciencias. Posgrado en Ciencias Biológicas. Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. Cd. Mx., México. 97 pp.
- Baranowska, I., H. Barchańska y A. Pyrsz. 2005. Distribution of pesticides and heavy metals in trophic chain. Chemosphere 60: 1590-1599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.02.053>
- Barney, J. N. y T. H. Whitlow. 2008. A unifying framework for biological invasions: the state factor model. Biological Invasions 10: 259-272. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10530-007-9127-8>
- Battin, J. 2004. When good animals love bad habitats: ecological traps and the conservation of animal populations. Conservation Biology 18: 1482-1491. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00417.x>
- Begon, M., C. R. Townsend y J. L. Harper. 2005. Ecology: From Individuals to Ecosystems, 4th Edition. Wiley-Blackwell. Oxford, UK. 750 pp.
- Bejarano-Castillo, M. y S. Guevara. 2008. Algunos atributos de los árboles que atraen frugívoros a los potreros. Cuadernos de Biodiversidad 27. Universidad de Alicante. Alicante, España. Pp. 3-10. DOI: <https://doi.org/10.14198/cdbio.2008.27.01>





- Bissonette, J. A. 2003. Linking landscape patterns to biological reality. In: Bissonette, J. A. e I. Storch (eds.). Landscape Ecology and Resource Management. Linking Theory with Practice. Island Press. Washington D.C., USA. Pp. 15-34.
- Bolan, N. S., M. B. Kirkham y Y. S. Ok (eds.). 2018. Spoil to soil mine site rehabilitation and revegetation. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton, USA. 371 pp. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351247337>
- Bourgeron, P., A. Kliskey, L. Alessa, H. Loescher, K. Krauze, A. Virapongse y D. L. Griffith. 2018. Understanding large-scale, complex, human-environmental processes: a framework for social-ecological observatories. *Frontiers in Ecology and the Environment*, Special Issue Social-ecological systems in mountain landscapes 16(S1): S52-S66. DOI: <https://doi.org/10.1002/fee.1797>
- Bradshaw, A. D. 1983. The Reconstruction of ecosystems. *Journal of Applied Ecology* 20(1):1-17.
- Bradshaw, A. D. y M. J. Chadwick. 1980. The Restoration of Land. Blackwell Scientific Publications. Boston, USA. 317 pp. DOI: <https://doi.org/10.1177/030913338200600314>
- Brown, D., R. G. Hallman, Ch. R. Lee, J. G. Skogerboe, K. Eskew, R. A. Price, N. R. Page, M. Clar, R. Kort y H. Hopkins. 1986. Reclamation and vegetative restoration of problem soils and disturbed land. Pollution technology review No. 139. Parks and Wildlife Division Department of Environment and Climate Change. New Jersey, USA. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq1987.00472425001600040029x>
- Bruns, D.A. y G. B. Wiersma. 2004. Conceptual basis of environmental monitoring systems: A Geospatial Perspective. In: Wiersma, G. B. (ed.). Environmental Monitoring. CRC PRESS. Boca Raton, USA. 35 pp. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203495476>
- Buczyńska, A. 2020. Remote sensing and GIS technologies in land reclamation and landscape planning processes on post-mining areas in the Polish and world literature. AIP Conference Proceedings 2209(1): 040002. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0000009>
- Bundschuh, J., M. I. Litter, F. Parvez, G. Román-Ross, H. B. Nicolli, J. Jiin-Shuh, L. Chen-Wuing, D. López, M. A. Armienta, L. R. G. Guilherme, A. Gomez Cuevas, L. Cornejo, L. Cumbal y R. Toujaguez. 2011. One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries. *Science of the Total Environment* 429: 2-35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.024>
- Camarillo Reyes, A. S. 2014. Tolerancia a metales pesados y oxianiones de plantas que crecen en suelo contaminado con jales en Zimapán, Hidalgo. Proyecto de Integración en Ingeniería Ambiental, División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana. Cd. Mx. México. 63 pp.
- Candeias, C., E. Ferreira da Silva, P. F. Ávila y J. P. Teixeira. 2014. Identifying sources and assessing potential risk of exposure to heavy metals and hazardous materials in mining areas: The case study of Panasqueira Mine (Central Portugal) as an example. *Geosciences* 4: 240-268. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences4040240>
- Cárdenas, J. 2013. La minería en México: despojo a la nación. *Revista Mexicana de Derecho Constitucional* 28: 35-74. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1405-9193\(13\)71275-7](https://doi.org/10.1016/S1405-9193(13)71275-7)
- Cardoza, R., L. Cuevas, J. S. García, J.A. Guerrero, J. C. Gonzalez, H. Hernández, M. L. Lira, J. L. Nieves, D. Tejeda y C. M. Vázquez. 2007. Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Zapopan, México.
- Carrillo-Saucedo, S. M., J. Puente-Rivera, S. Montes-Recinas y R. Cruz-Ortega. 2022. Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta Botanica Mexicana* 129: e1932. DOI: <https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1932>
- Castañeda-Bautista, J. A. 2016. Estudio ecotoxicológico de los jales mineros de Huautla, Morelos: El caso de *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Beth. (Fabaceae). Tesis de maestría. Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, México. 73 pp.
- Castillo-Campos, G. y B. Juárez. 2012. Capítulo 4: La vegetación y su potencial en la rehabilitación ecológica en minas a cielo abierto en Orizaba, Veracruz. In: Fragoso, C. y P. Rojas Fernández (eds.). Monitoreo Ecológico de una cantera rehabilitada por cementos Holcim Apasco en Veracruz. Instituto de Ecología, A.C.- Cementos HOLCIM APASCO. Xalapa, México. Pp. 91-118.
- Ceccon, E. 2013. Restauración en bosques tropicales: Fundamentos ecológicos, prácticos y sociales. Ediciones Díaz de Santos. México, D.F., México. 289 pp.
- Cervantes-Ramírez, L. T., M. Ramírez-López, P. Mussali-Galante, M. L. Ortiz-Hernández, E. Sánchez-Salinas y E. Tovar-Sánchez. 2018. Heavy metal biomagnification and genotoxic damage in two trophic levels exposed to mine tailings: a network

- theory approach. *Revista Chilena de Historia Natural* 91: 6. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40693-018-0076-7>
- Chaulya, S. y G. M. Prasad. 2016. Sensing and monitoring technologies for mines and hazardous areas. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. 432 pp. DOI: <https://doi.org/10.1016/c2014-0-02742-6>
- Chávez Ramírez, E. A. 2020. Análisis Ecotoxicológico de Comunidades de anuros que habitan en áreas cercanas a un jal minero en Sierra de Huautla. Maestro en Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación. Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, México. 81 pp.
- Chazdon, R. L. y M. Uriarte. 2016. Natural regeneration in the context of large-scale forest and landscape restoration in the tropics. *Biotropica* 48(6): 709-715. DOI: <https://doi.org/10.1111/btp.12409>
- Chen, F., Y. Yang, J. Mi, R. Liu, H. Hou y S. Zhang. 2019. Effects of vegetation pattern and spontaneous succession on remediation of potential toxic metal-polluted soil in mine dumps. *Sustainability* 11(2): 397. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11020397>
- Christmann, T. e I. Oliveras Menor. 2021. A synthesis and future research directions for tropical mountain ecosystem restoration. *Nature, Scientific Reports* 11: 23948. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03205-y>
- Clewell, A. F. y J. Aronson. 2013. Restauración ecológica: principios, valores y estructura de una profesión emergente. Island Press. Washington, DC, EUA. 587 pp. DOI: <https://doi.org/10.5822/978-1-59726-323-8>
- CONABIO. 2010. Estrategia nacional sobre especies invasoras en México, prevención, control y erradicación. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México, D.F., México. 91 pp.
- Cooke, J. A. y M. S. Johnson. 2002. Ecological restoration of land with particular reference to the mining of metals and industrial minerals: A review of theory and practice. *Environmental Reviews* 10(1): 41-71. DOI: <https://doi.org/10.1139/A01-014>
- Corder, G. D. 2006. Chapter 16. Tailings disposal. In: Napier-Munn, T. (ed.). *Wills' Mineral Processing Technology*. Butterworth-Heinemann. Oxford, UK. Pp. 400-408.
- Cornwall, A. y R. Jewkes. 1995. What is participatory research? *Social Science & Medicine* 41(12): 1667-1676. DOI: [https://doi.org/10.1016/0277-9536\(95\)00127-S](https://doi.org/10.1016/0277-9536(95)00127-S)
- Corrales-Pérez, D. y F. M. Romero. 2013. Evaluación de la peligrosidad de jales de zonas mineras de Nicaragua y México y alternativas de solución. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 65(3): 427-446. DOI: <https://doi.org/10.18268/BSGM2013v65n3a1>
- Cross, S. L., P. W. Bateman y A. T. Cross. 2020. Restoration goals: Why are fauna still overlooked in the process of recovering functioning ecosystems and what can be done about it? *Ecological Management & Restoration* 21(1): 4-8. DOI: <https://doi.org/10.1111/emr.12393>
- Cross, S. L., H. S. Bradley, E. P. Tudor, M. D. Craig, S. Tomlinson, M. J. Bamford, P. W. Bateman y A. T. Cross. 2021. A life-of-mine approach to fauna monitoring is critical for recovering functional ecosystems to restored landscapes. *Restoration Ecology* 30(S1): e1540. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.13540>
- Cruz Ruiz, E. 2017. Efecto del encalado, abonado y fertilización de jales mineros ácidos sobre la biodisponibilidad química y bioacumulación de Cu, Cd, Pd y Zn en *Festuca arundinacea*. Tesis de maestría en ciencias de la Tierra. Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F., México. 97 pp.
- Curi, A., W. J. V. Granda, H. M. Lima y W. T. Sousa. 2006. Las zeolitas y su aplicación en la descontaminación de efluentes mineros. *Información Tecnológica* 17(6): 111-118. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642006000600017>
- Dafana, M., I. W. Nyakudya, C. A. T. Katsvanga y L. Jimu. 2010. Comparative analysis of the early growth performance of indigenous acacia species in Revegetating trojan nickel mine tailings in Zimbabwe. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry* 9(8): 1393-1403.
- Dávila Luna, J., R. E. Díaz Caravantes, L. A. Navarro Navarro y E. Romeo Méndez. 2018. Las presas de jales en el noroeste del estado de Sonora: una aproximación geográfica mediante percepción remota. *Investigaciones Geográficas* 97: 1-18. DOI: <https://doi.org/10.14350/rig.59624>
- Dawoudian, J., S. Bahamin y H. Bikwibili Tantoh. 2021. Environmental impact assessment of cement industries using mathematical matrix method: case of Ghayen cement, South Khorasan, Iran. *Environmental Science and Pollution*

- Research 28: 22348-22358. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12012-3>
- De la Cruz Guarneros, N. 2018. Efecto de la bioacumulación de metales en la población de *Liomys irroratus* (Gray 1868) que habita los jales de Huautla, Morelos: un enfoque multibiomarcadores. Centro de Investigaciones en Biotecnología, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, México. 67 pp.
- de la Peña-Domene, M., C. Martínez-Garza, S. Palmas-Pérez, E. Rivas-Alonso y H. F. Howe. 2014. Roles of birds and bats in early tropical-forest restoration. PLoS ONE 9(8): e104656. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104656>
- Delgado Ramos, G. C. 2010. La gran minería en América Latina, impactos e implicaciones. Acta Sociológica 54: 17-47. DOI: <https://doi.org/10.22201/fcpys.24484938e.2011.54.25663>
- Díaz Alvarado, J., J. A. Vixta Haro, J. M. Velázquez Cortés, M. Vega Hernández, J. C. Mendoza Hernández y A. Silveti Loeza. 2020. Movilidad de Mn, Ni y Zn en jales mineros sometidos a tratamientos de biorremediación. Memorias XVIII Congreso Internacional y XXIV Congreso Nacional De Ciencias Ambientales del 3-7 de Junio de 2019, Mazatlán, Sinaloa. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 36: 55. DOI: <https://doi.org/10.20937/RICA.2020.36.MCIyCNCA>
- Dickey, J. W. E., R. N. Cuthbert, J. South, J. R. Britton, J. Caffrey, X. Chang, K. Crane, N. E. Coughlan, E. Fadaei, K. D. Farnsworth, S. M. H. Ismar-Rebitz, P. W. S. Joyce, M. Julius, C. Lavery, F. E. Lucy, H. J. MacIsaac, M. McCard, C. L. O. McGlade, N. Reid, A. Ricciardi, R. J. Wasserman, O. L. F. Weyl y J. T. A. Dick. 2020. On the RIP: using Relative Impact Potential to assess the ecological impacts of invasive alien species. NeoBiota 55: 27-60. DOI: <https://doi.org/10.3897/neobiota.55.49547>
- ELAW. 2010. Guía para evaluar EIAs de proyectos mineros. 1era Edición. Environmental Law Alliance Worldwide (ELAW). Oregon, EUA. 120pp.
- Ehrenfeld, J. G. 2010. Ecosystem Consequences of Biological Invasions. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 41: 59-80. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144650>
- EIANZ. 2015. Ecological Impact Assessment (EiA). Environmental Institute of Australia and New Zealand (EIANZ) guidelines for use in New Zealand: terrestrial and freshwater ecosystems. Melbourne, Australia. 100 pp.
- Eissa, M. A. y O. Negim. 2018. Heavy metals uptake and translocation by lettuce and spinach grown on a metal-contaminated soil. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 18(4): 1097-1107. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-95162018005003101>
- Escobar Salazar, J. A. 2021. Criterios neoliberales de las políticas públicas en el sector minero y su papel en el origen de los conflictos socioambientales en el estado de Morelos. Maestro en Estudios Regionales. Centro de Investigación en Ciencias Sociales y Estudios Regionales, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, México. 133 pp.
- Esteller, M. V., E. Domínguez-Mariani, S. E. Garrido y M. Avilés. 2015. Groundwater pollution by arsenic and other toxic elements in an abandoned silver mine, Mexico. Environmental Earth Science 74: 2893-2906. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4315-9>
- Esteves Aguilar, J. 2018. Evaluación del daño genético y la inestabilidad en el desarrollo del cráneo en la especie centinela *Peromyscus melanophrys* que habita en zonas mineras. Centro de Investigación en Biotecnología, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, México. 75 pp.
- Ewel, J. J. 1987. Restoration is the ultimate test of ecological theory. In: Jordan III, M. E, Gilpin y J. D. Aber (eds.). Restoration Ecology: A synthetic approach to ecological. Cambridge University Press. New York, USA:
- Ewel, J. J., D. J. O'Dowd, J. Bergelson, C. C. Daehler, C. M. D'Antonio, L. D. Gómez, D. R. Gordon, R. J. Hobbs, A. Holt, K. R. Hopper, C. E. Hughes, M. LaHart, R. R. B. Leakey, W. G. Lee, L. L. Loope, D. H. Lorence, S. M. Louda, A. E. Lugo, P. B. McEvoy, D. M. Richardson y P. M. Vitousek. 1999. Deliberate introductions of species: Research needs. Benefits can be reaped, but risks are high. BioScience 49(8): 619-630. DOI: <https://doi.org/10.2307/1313438>
- FAO. 2019. Soil erosion: the greatest challenge to sustainable soil management. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome, Italy. 100 pp.
- Farina, A. 2000. Principles and methods in landscape ecology. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. 235 pp. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5535-5>
- Förstner, U., E. Beiteringer, F. Tarnowski, M. Gehrke, H. Burmeier y P. Jacobs. 2002. Chapter 13: Soil and Sediment remediation.





- In: Burden, F. R., I. A. McKelvie, U. Förstner, A. Guenther y F. R. Burden (eds.). Environmental monitoring Handbook. McHraw-Hill Professional Publishing. New York, USA. Pp. 256-302.
- Fragoso, C. y P. Rojas (eds.). 2012. Monitoreo Ecológico de una cantera rehabilitada por cementos HOLCIM APASCO en Veracruz. Instituto de Ecología, A.C.-Cementos HOLCIM APASCO. Xalapa, México. 256 pp.
- Fundar. 2021. Hay 65 basureros de residuos mineros en Áreas Naturales Protegidas; urgente que Senado proteja las ANP de la minería. Fundar, Centro de Análisis e Investigación, A.C. <https://fundar.org.mx/hay-65-basureros-de-residuos-mineros-en-areas-naturales-protegidas-urgente-que-senado-proteja-las-anp-de-la-mineria/> (consultado diciembre de 2021).
- Gadepalle, V. P., K. O. Sabeha, R. Van Herwijnen y T. Hutchings. 2007. Immobilization of heavy metals in soil using natural and waste materials for vegetation establishment on contaminated sites. *Soil & Sediment Contamination* 16(2): 233-251. DOI: <https://doi.org/10.1080/15320380601169441>
- Gagnon, A., N. J. Fenton, P. Sirois, P. y J. F. Boucher. 2021. Plant community diversity at two reclaimed mine tailing storage facilities in Québec, Canada. *Land* 10(11): 1191. DOI: <https://doi.org/10.3390/land10111191>
- Gaitán, J., M. F. Navarro, L. T. Vüegen, M. J. Pizarro, P. Carfagno y S. Rigo. 2017. Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina. Ediciones INTA. 1ª ed., Instituto de Suelos, Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIRN), Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INTA). Buenos Aires, Argentina. 65 pp.
- Galván Ramírez, M. A. 2020. Estructura de la comunidad de roedores silvestres asociados a jales de Huautla, Morelos. Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, México. 83 pp.
- Gallaga, S. y B. Juárez. 2012. La Rehabilitación ambiental implementada por CECAF y HOLCIM APASCO en la cantera Cuautlapan, Orizaba, México. In: Fragoso, C. y P. Rojas (eds.). Monitoreo Ecológico de una cantera rehabilitada por cementos HOLCIM APASCO en Veracruz. Instituto de Ecología, A.C.-Cementos HOLCIM APASCO. Xalapa, México. Pp. 45-90.
- Gann, G. D., T. McDonald, B. Walder, J. Aronson, C. R. Nelson, J. Jonson, J. G. Hallett, C. Eisenberg, M. R. Guariguata, J. Liu, F. Hua, C. Echeverría, E. Gonzales, N. Shaw, K. Decler y K. W. Dixon. 2019. International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology* 27(S1): S1-S46. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.13035>
- García Aguirre, K. K, F. A. Paredes Sánchez, V. Segovia Tagle y J. S. Espinosa Ramírez. 2018. Efecto de los lixiviados de jales de mina en un humedal natural. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias* 9(21): 1042-1054.
- Garduño Sanabria, A. E. 2013. Vulnerabilidad, ante los movimientos de ladera en el pueblo Santa Cruz Ayotuxco, municipio de Huixquilucan, Estado de México. Tesis de licenciatura en Geografía. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México. 224 pp.
- Gerencia de Restauración Forestal. 2018. Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 5ª edición. Zapopan, México.
- González-Chávez, M. C. A. 2005. Recuperación de suelos contaminados con metales pesados utilizando plantas y microorganismos rizosféricos. *Terra Latinoamericana* 23(1): 29-37.
- Google Earth. 2021. Google Earth versión 9.176.0.1. Mountain View, USA. <https://earth.google.com/web/search/Huautla,+Morelos,+Morelos/@18.43600193,-99.02224671,973.35284868a,494.2521082d,35y,-90.02465741h,44.98902875t,-Or/data=CigiJgokCVsjHfytozNAEVYjHfytozPAGctrLb9amjJAIXHwDjsDjl-TA> (consultado agosto de 2021).
- Goussen, B., O. R. Price, C. Rendal y R. Ashauer. 2016. Integrated presentation of ecological risk from multiple stressors. *Scientific Reports* 6: 36004. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep36004>
- Graf, W. L., J. Stromberg y B. Valentine. 2002. Rivers, dams, and willow flycatchers: a summary of their science and policy connections. *Geomorphology* 47(2-4): 169-188. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00087-9](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00087-9)
- Guerra Sierra, B. E., J. Muñoz Guerrero y S. Sokolski. 2021. Phytoremediation of heavy metals in tropical soils: an Overview. *Sustainability* 13(5): 2574. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13052574>



- Haldar, S. K. 2018. Mineral exploration. Principles and applications. Elsevier. Cambridge, USA. 374 pp. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-05550-3>
- Hernández-Acosta, E., E. Mondragón-Romero, D. Cristobal-Acevedo; J. E. Rubiños-Panta y E. Robledo-Santoyo. 2009. Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(2): 109-114
- Hernández-Galindo, M. A. 2016. Fenología floral, expresión sexual de árboles y visitantes florales en sitios de restauración ecológica experimental en Sierra de Huautla, Morelos. Tesis de licenciatura en Biología. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. 70 pp.
- Hernández Sampieri, R., C. Fernández Collado y M. del P. Baptista Lucio. 2014. Metodología de la Investigación. Mc Graw Hill Education. México, D. F., México. 600 pp.
- Holl, K. D. y T. M. Aide. 2011. When and where to actively restore ecosystems? *Forest Ecology and Management* 261: 1558-1563. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.004>
- Hossner, L. R. y F. M. Hons. 1992. Reclamation of Mine Tailings. In: Lal, R. y B. A. Stewart (eds). *Soil Restoration. Advances in Soil Science*, Vol 17. Springer, New York, USA. Pp. 311-350. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2820-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2820-2_10)
- Howe, H. F. y C. Martínez-Garza. 2014. Restoration as experiment. *Botanical Sciences* 92(4): 459-468. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsci.146>
- Hustrulid, W., M. Kuchta y R. Martin. 2013. Open Pit Mine Planning & Design. Volume 1 - Fundamentals. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton, USA. DOI: <https://doi.org/10.1201/b15068>
- INEGI. 2011. La industria minera ampliada: Censos Económicos 2009. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México. 99 pp.
- Islas Vargas, M. 2013. Extractivismo de enclave y minería a cielo abierto: impactos y consecuencias socio-ambientales. Tesis de licenciatura en Sociología. Facultad de Ciencias. Cd. Mx., México. 129 pp.
- Jordan III, W. R., M. E. Gilpin y J. D. Aber. 1987. Restoration ecology: ecological restoration as a technique for basic research. In: Jordan III, M. E, Gilpin y J. D. Aber (eds.). *Restoration ecology: A synthetic approach to ecological*. Cambridge University Press. New York, USA.
- Kabas, S., J. A. Acosta, R. Zornoza, A. Faz Cano, D. M. Carmona y S. Martínez-Martínez. 2011. Integration of landscape reclamation and design in a mine tailing in Cartagena-La Unión, SE Spain. *International Journal of Energy and Environment* 2(5): 301-308. DOI: <https://doi.org/10.31428/10317/3900>
- Keel, S., R. Sayre y G. Sedaghatkish. 2000. Chapter 5. Vegetation and Plant Species Surveys. In: Sayre, R., E. Roca, G. Sedaghatkish, B. Young, S. Keel, R. L. Roca y S. Sheppard (eds.). *Nature in Focus, Rapid Ecological Assessment*. The Nature Conservancy. Island Press. Washington D.C., USA. 183 pp.
- Kiere, L. M., M. Osorio-Beristain, V. Sorani, D. Prieto-Torres, A. Navarro-Sigüenza y L. A. Sánchez-González. 2021. Do metal mines and their runoff affect plumage color? A regional scale study of streak-backed orioles in south-central Mexico. *Ornithological Applications* 123(3): 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1093/ornithapp/duab023>
- Kim, S., Y. Choi, J. Suh, S. Oh, H. Park y S. Yoon. 2012. Estimation of soil erosion and sediment yield from mine tailing dumps using GIS: a case study at the Samgwang mine, Korea. *Geosystem Engineering* 15(1): 2-9. DOI: <https://doi.org/10.1080/12269328.2012.674426>
- Kussmaul, S. 1989. La minería en Costa Rica y sus Efectos en el ambiente. In: Zamora, D. (ed.). *El impacto ambiental por la actividad minera en Costa Rica*. EUNA. Heredia, Costa Rica. Pp. 17-25.
- Lasat, M. M. 1999. Phytoextraction of metals from contaminated soil: A review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues. *Journal of Hazardous Substance Research* 2(1): 1-25 DOI: <https://doi.org/10.4148/1090-7025.1015>
- Levine, J. M. 2008. Biological invasions. *Current Biology* 18(2): 57-60. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.11.030>
- Lim, J. E., M. Ahmad, S. S. Lee, C. L. Shope, Y. Hashimoto, K-R. Kim, A. R. A. Usman, J. E. Yang y Y. S. Ok. 2013. Effects of lime-based waste materials on immobilization and phytoavailability of cadmium and lead in contaminated soil. *CLEAN Soil, Air, Water* 41(12): 1235-1241. DOI: <https://doi.org/10.1002/clen.201200169>
- Lizárraga-Mendiola, L., D. E. Ángeles-Chávez, A. Blanco-Piñón, M. Ramírez-Cardona, F. J. Olguín-Coca y M. R. González-Sandoval. 2014. Contamination potential of an urban mine tailings deposit in Central Mexico - A preliminary estimation.

- International Journal of Geosciences 5(3): 296-312. DOI: <https://doi.org/10.4236/ijg.2014.53030>
- Lizárraga-Mendiola, L., C. A. Bigurra-Alzati, D. F. Paz-Casas, S. Montiel-Palma, M. R. González-Sandoval, I. E. Castañeda-Robles, L. D. López-León, F. J. Olguín-Coca y F. O. Lagarda-García. 2017. Empleo de jal como cementante en la elaboración de un concreto permeable. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales* 4: 92- 101.
- López Aburto, V. M. 1994. Manual para la selección de métodos de exploración de minas. Departamento de Explotación de Minas y Metalurgia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Cd. Mx., México. 123 pp.
- López-Barrera, F., J. G. García-Franco, K. Mehlreter, O. Rojas-Soto, A. Aguirre, R. Landgrave, A. Ortega-Pieck, B. Montes-Hernández, K. Aguilar-Dorantes, A. A. Díaz-Sánchez, G. Vázquez-Carrasco y B. B. Rojas Santiago. 2016. Ecología de la restauración del bosque nublado en el centro de Veracruz. In: Ceccon, E. y C. Martínez-Garza (eds.). *Experiencias mexicanas en la restauración de los ecosistemas*. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Cuernavaca, México. Pp. 103-129.
- López Michelena, A. 2021. Variación de la coloración del plumaje de aves residentes, asociada a la distancia a las concesiones de minería metálica en el centro-sur de México. Tesis de maestría en Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación. Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, México. 78 pp.
- Loredo-Ostí, C., S. Beltrán López, F. Moreno Sánchez y M. Casiano Domínguez. 2007. Riesgo a la erosión hídrica y proyección de acciones de manejo y conservación del suelo en 32 microcuencas de San Luis Potosí. Libro Técnico 3. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Noreste, Campo Experimental San Luis. San Luis Potosí, México. 209 pp.
- Lottermoser, B. G. 2010. *Mine Wastes. Characterization, treatment and environmental impacts*. Springer-Verlag Heidelberg. Berlin, Germany. 400 pp. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8>
- Louda, S. M., A. E. Arnett, T. A. Randy F. L. Russell. 2003. Invasiveness of some biological control insects and adequacy of their ecological risk assessment and regulation. *Conservation Biology* 17(1): 73-82. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2003.02020.x>
- Louda, S. T. y P. Stiling. 2004. The double-edged sword of biological control in conservation and restoration. *Conservation Biology* 18(1): 50-53. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00070.x>
- Luque Agraz, D., A. D. Murphy, E. C. Jones, A. Martínez-Yrizar, A. Búrquez Montijo, T. Manrique Gallardo y D. Esquer Armienta. 2019. Río Sonora: el derrame de la Mina Buenavista del Cobre-Cananea, 2014. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Hermosillo, México. 134 pp.
- MacGregor Arroyo, F. 1992. Ampliación de las operaciones mineras en mina Santiago, Distrito minero de Huautla. Tesis de Ingeniería de Minas y Metalurgista. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Cd. Mx., México. 85 pp.
- Mandelik, Y, T. Dayan y E. Feitelson. 2005. Planning for biodiversity: the role of ecological impact assessment. *Conservation Biology* 19(4): 1254-1261. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00079.x>
- Manzanares Acuña, E., H. R. Vega Carrillo, M. C. Escobar León, C. Letechipía de León, L. J. Guzmán Enríquez, V. M. Hernández Dávila y M. A. Salas Luévano. 2005. Evaluación de riesgos ambientales por plomo en la población de Vetagrande, Zacatecas. Unidad Académica de Estudios Nucleares, Universidad Autónoma de Zacatecas. Reporte Final: UaEN/RI-02-PbVG/INE-02/03081204. Zacatecas, México. 50 pp. [http://www2.inecc.gob.mx/descargas/sqre/inf\\_vetagrande\\_final\\_1004\\_e\\_ine\\_final.pdf](http://www2.inecc.gob.mx/descargas/sqre/inf_vetagrande_final_1004_e_ine_final.pdf) (consultado agosto de 2022).
- Márquez-Huitzil, R. 1999. Regeneración de la vegetación en distintos ensayos de restauración de minas de roca caliza a cielo abierto en una industria cementera, Ixtaczoquitlán, Veracruz. Tesis de maestría en Ecología y Manejo de Recursos Naturales. Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz, México. 158 pp.
- Márquez-Huitzil, R. 2005. Planificación para la restauración asociada con el aprovechamiento de los recursos naturales. In: Sánchez, O., E. Peters, R. Márquez-Huitzil, E. Vega, G. Portales, M. Valdez y D. Azuara (eds.). *Temas sobre restauración ecológica*. Diplomado en restauración ecológica. Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales, Instituto



- Nacional de Ecología, U.S. Fish & Wildlife Service, Unidos para la Conservación, A.C. Cd. Mx., México. Pp. 169-179.
- Márquez-Huitzil, R., B. Juárez y S. Gutiérrez. 1998. Informe final del Programa de Evaluación de la Restauración ecológica (1998). Convenio Apasco-Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz, México.
- Martin, T. A. y M. V. Ruby. 2003. In situ remediation of arsenic in contaminated soils. *REMEDIATION* 14(1): 21-32 DOI: <https://doi.org/10.1002/rem.10092>
- Martínez, Y. y C. Rivero. 2005. Evaluación de diferentes métodos para determinar las fracciones de metales pesados presentes en el suelo. *Revista Ingeniería UC* 12(3): 14-20.
- Martínez-Garza, C., M. Méndez-Toribio, E. Ceccon y M. R. Guariguata. 2021. Ecosystem restoration in Mexico: insights on the project planning phase. *Botanical Sciences* 99: 1-36. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsci.2695>
- Martínez-Garza, C., M. Osorio-Beristain, R. E. Alcalá-Martínez, D. Valenzuela-Galván y N. Mariano. 2016. Ocho años de restauración experimental en las selvas estacionales de México. In: Ceccon, E. y C. Martínez-Garza (coord.). *Experiencias mexicanas en la restauración de los ecosistemas*. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Cuernavaca, México. Pp. 385-406.
- Martínez-Trinidad, S., G. Hernández Silva, M. E. Ramírez Islas, J. Martínez Reyes, G. Solorio Munguía, S. Solís Valdez y R. García Martínez. 2013. Total mercury in terrestrial systems (air-soil-plant-water) at the mining region of San Joaquín, Queretaro, Mexico. *Geofísica Internacional* 52(1): 43-58. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7169\(13\)71461-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7169(13)71461-2)
- Mazej, Z., S. A. Sayegh-Petkovsiek y B. Pokorny. 2010. Heavy metal concentrations in food chain of Lake Velenjsko jezero, Slovenia: An artificial lake from Mining. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 58: 998-1007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00244-009-9417-5>
- Meffe, G. K. y C. R. Carroll (eds.). 1994. *Principles of conservation biology*. Sinauer Associates, Inc., Sunderland, USA. 600 pp.
- Mench, M., N. Lepp, V. Bert, J. P. Schwitzguébel, S-W. Gawronski, P. Schröder y J. Vangronsveld. 2010. Successes and limitations of phytotechnologies at field scale: outcomes, assessment and outlook from COST Action 859. *Journal of Soils and Sediments* 10: 1039-1070. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-010-0190-x>
- Méndez Ramírez, I. 2012. Método Científico, aspectos epistemológicos y metodológicos para el uso de la estadística. *SaberEs* 4: 3-15. DOI: <https://doi.org/10.35305/s.v0i4.73>
- Méndez Ramírez, I., D. Namihira Guerrero, L. Moreno Altamirano y C. Sosa de Martínez. 1996. *El protocolo de investigación. Lineamientos para su elaboración y análisis*. Editorial Trillas. Cd. Mx., México. 210 pp.
- Mendoza, P. E. 2013. *Comunidades sintéticas para la restauración sucesional del bosque de encino y el matorral xerófilo del Ajusco medio, Distrito Federal, México*. Tesis de doctorado en Ciencias. Posgrado en Ciencias Biológicas. Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F., México. 146 pp.
- Meza-Figueroa, D., R. M. Maier, M. de la O-Villanueva, A. Gómez-Alvarez, A. Moreno-Zazueta, J. Rivera, A. Campillo, C. Grandlic, R. Anaya y J. Palafox-Reyes. 2009. The impact of unconfined mine tailings in residential areas from a mining town in a semi-arid environment: Nacozari, Sonora, Mexico. *Chemosphere* 77(1): 140-147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.04.068>
- Meuser, H. 2013. *Soil remediation and rehabilitation treatment of contaminated and disturbed land*. Springer Science+Business Media Dordrecht. London, UK. 406 pp. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5751-6>
- MINAM. 2014. *Guía para el Muestreo de Suelos*. Ministerio del Ambiente, Dirección General de Calidad Ambiental, Gobierno de Perú. San Isidro, Perú. 47 pp.
- Montes Rocha, J. A. 2016. *Efecto de los metales pesados en suelo de jales mineros de San Luis Potosí*. Tesis de maestría en Ciencias Ambientales. Programas Multidisciplinarios de Posgrado en Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias Químicas, Ingeniería y Medicina, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México. 160 pp.
- Moreno Montemayor, H. 2017. *Residuos peligrosos y pasivos ambientales en México. Una comparación de normativas ambientales*. Facultad de Ciencias Políticas y Relaciones Internacionales, Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, México. 80 pp.

- Moriarty, F. 1999. Ecotoxicology, the study of pollutants in ecosystems. Academic Press. San Diego, USA. 347 pp.
- Muro González, D. A. 2020. Caracterización de especies vegetales para fitorremediar suelos contaminados con metales pesados en jales mineros. Tesis de doctorado en Ciencias Naturales. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, Morelos, México. 97 pp.
- Naidu, R., N. S. Bolan, M. Megharaj, A. L. Juhasz, S. K. Gupta, B. E. Clothier y R. Schulin. 2008. Chemical bioavailability in terrestrial environments. In: Naidu, R., N. S. Bolan, M. Megharaj, A. L. Juhasz, S. K. Gupta, B. E. Clothier y R. Schulin. Chemical Bioavailability. In Terrestrial Environments. Elsevier. Oxford, UK. Pp. 1-6. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(07\)32001-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(07)32001-1)
- Naidu, R., R. Channey, S. McConnell, N. Johnston, K. T. Semple, S. Mcgrath, V. Dries, P. Nathanail, J. Harmsen, A. Pruszinski, J. Macmillan y T. Palanisami. 2015. Towards bioavailability-based soil criteria: past, present and future perspectives. Environmental Science and Pollution Research 22: 8779-8785. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1617-x>
- Nieto Ávila, J. L. 1997. Proyecto para la ampliación de la mina Cuatro Ases en la Unidad Huautla, de la compañía Rosario México, Huautla, Morelos. Tesis de Ingeniería de Minas y Metalurgista. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Cd. Mx., México. 55 pp.
- Nyakudya, I. W., L. Jimu, C. A. T. Katsvanga y M. Dafana. 2011. Comparative analysis of the early growth performance of indigenous *Acacia* species in revegetating trojan nickel mine tailings in Zimbabwe. African Journal of Environmental Science and Technology 5(3): 218-227.
- Olenin, S., S. Gollasch, M. Lehtiniemi, M. Sapota y A. Zaiko. 2017. Biological invasions. In: Snoeijs-Leijonmalm, P., H. Schubert y T. Radziejewska (eds.). Biological Oceanography of the Baltic Sea. Springer Science. Dordrecht, The Netherlands. Pp. 193-232. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-0668-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0668-2_5)
- Oreja, B., M. Goberna, M. Verdú y J. A. Navarro-Cano. 2020. Constructed pine log piles facilitate plant establishment in mining drylands. Journal of Environmental Management 271: 111015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111015>
- Ortega, J. J. 2014. Biorremediación y biodisponibilidad: ¿Dónde están los límites? Biosaia 3: 1.
- Ortega-Álvarez, R., W. Tobón, T. Urquiza-Haas, S. P. Ruiz-González y P. Koleff. 2021. Exploring local perceptions, implementation, benefits, and limitations of community-based restoration projects in Mexico. Restoration Ecology 30(7): e13604. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.13604>
- Ortega-Larrocea, M. P., B. Xoconostle-Cázares, I. E. Maldonado-Mendoza, R. Carrillo-González, J. Hernández-Hernández, M. Díaz Garduño, M. López-Meyer, L. Gómez-Flores y M. C. A. González-Chávez. 2010. Plant and fungal biodiversity from metal mine wastes under remediation at Zimapán, Hidalgo, Mexico. Environmental Pollution 158: 1922-1931. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.10.034>
- Özyavuz, M. 2012. Protected Areas. In: Özyavuz, M. (ed.). Landscape planning. Published por InTech. Rijeka, Croacia. Pp. 3-20. DOI: <https://doi.org/10.5772/2761>
- Pahl-Wostl, C. 2002. Participative and stakeholder-based policy design, evaluation and modeling processes. Integrated Assessment 3(1): 3-14. DOI: <https://doi.org/10.1076/iaij.3.1.3.7409>
- Palenzuela, J. y Jk-M. Barea. 2009. El uso de hongos micorrízicos arbusculares en la revegetación de ecosistemas amenazados de desertificación en España. In: Álvarez-Sánchez, J. (ed.). Ecología de micorrizas arbusculares y restauración de ecosistemas. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Las prensas de Ciencias. México, D.F., México. 207-236 pp.
- Palmer, M. A., J. B. Zedler y D. A. Falk. 2016. Foundations of restoration ecology. Island Press. Washington D.C., USA. 364 pp. DOI: <https://doi.org/10.5822/978-1-61091-698-1>
- Parisien, M. A., A. Rutter, B. M. Smith y B. A. Zeeb. 2016. Ecological risk associated with phytoextraction of soil contaminants. Journal of Environmental Chemical Engineering 4: 651-656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.12.007>
- Parraga-Aguado, I., M. N. Gonzalez-Alcaraz, J. Alvarez-Rogel, F. J. Jimenez-Carceles y H. M. Conesa. 2013. The importance of edaphic niches and pioneer plant species succession for the phytomanagement of mine tailings. Environmental Pollution 176: 134-143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.01.023>
- Peña-Limón, C. E. y J. Paredes-Aguilar. 2019. Contaminación de corrientes superficiales por tóxicos minero-metalúrgicos en la Región Hidrológica Sonora-Sur. EPISTEMUS 13(27): 18-23. DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v13i27.112>



- Pérez Jiménez, S. 2014. Territorialidades contenciosas en México: el caso de la minería. Tesis de maestría en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, Instituto de Geografía, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. Morelia, México. 296 pp.
- Pérez, R., Y. Tapia, M. Antilén, M. Casanova, C. Vidal, C. Santander, H. Aponte y P. Cornejo. 2021. Interactive effect of compost application and inoculation with the fungus *Claroideoglomus claroideum* in *Oenothera picensis* plants growing in mine tailings. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 208: 111495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111495>
- Pineda Juárez, A. D. 2018. La minería transnacional de origen canadiense y sus impactos en territorios indígenas: Los casos de Takla Lake First Nation en Canadá y San José del Progreso en México, en el período de 2000 a 2016. Tesis de licenciatura en Relaciones Internacionales. Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, Universidad Nacional Autónoma de México. Cd. Mx., México. 156 pp.
- Pivet, B. E. 2001. Phytoremediation of contaminated soil and ground water at Hazardous Waste Sites. *Ground Water Issue*, United States Environmental Protection Agency. Washington D.C., USA. 36 pp.
- Pozo-Antonio, S., I. Puente-Luna, S. Lagüela-López y M. Veiga-Ríos. 2014. Techniques to correct and prevent acid mine drainage: A review. *DYNA* 81(186): 73-80. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n186.38436>
- Pueblos y Comunidades de Oaxaca. 2018. Informe: Juicio Popular comunitario contra el estado y las empresas mineras en Oaxaca. Comunidades y Organizaciones asistentes al Segundo Encuentro de Pueblos, Comunidades y Organizaciones "Aquí Decimos Sí a la Vida, No a la Minería". Oaxaca, México. 76 pp.
- Puell Ortiz, J. 2017. Methodology for a dump design optimization in large-scale open pit mines. *Cogent Engineering* 4(1): 1387955. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1387955>
- Ramírez Rodríguez, E. 2001. Almacenamiento de residuos mineros en México. Comisión Nacional del Agua. Reunión "Almacenamiento de Residuos Mineros". Comisión Nacional del Agua (CNA)-Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS)-Compañía Metalúrgica Mexicana (CMM). Cd. Mx., México.
- Ramos-Arroyo, Y. R. y C. D. Siebe-Grabach. 2006. Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 23(1): 54-74
- Ramos-Arroyo, Y. R., R. M. Prol-Ledesma y C. Siebe-Grabach. 2004. Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México. Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 21(2): 268-284
- Rebollo-Salinas, D. B. 2019. Biomagnificación de metales pesados en una cadena trófica en los jales de Huautla, Morelos. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, México. 83 pp.
- Reyes Mariano, J. M. 2014. Propiedades mecánicas de jales para diseño de presas. Tesis de maestría en Ingeniería (Geotecnia). Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. 69 pp.
- Reyna Rosas, E. 2009. Evaluación de cambios nucleares en el epitelio bucal de individuos expuestos a metales en el agua de bebida en Huautla, Morelos. Tesis de Biología. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Cd. Mx., México. 73 pp.
- Rico, A. 2016. Análisis de la estabilidad para la ampliación de una presa de jales. Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco. Instituto Politécnico Nacional. Cd. Mx., México. 114 pp.
- Riitters, K. y B. Tkacz. 2004. The U.S. Forest Health Monitoring Program. In: Wiersma, G. B. (ed.). *Environmental Monitoring*. CRC PRESS. Boca Raton, USA. Pp. 669-683.
- Rivera Castelo, J. A. 2009. Diseño geotécnico para estabilización del depósito de jales mineros (Presa I), en Nacozari de García, Sonora, México. Tesis de Ingeniería Geológica. División de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Sonora. Hermosillo, México. 122 pp.
- Robertson, B. A. y R. L. Hutto. 2006. A framework for understanding ecological traps and an evaluation of existing evidence. *Ecology* 87(5): 1075-1085. DOI: [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2006\)87\[1075:AFFUET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2006)87[1075:AFFUET]2.0.CO;2)
- Romero, F. M. y M. Gutiérrez-Ruiz. 2010. Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en





- el sur y centro de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 62(1): 43-53.
- Rossiter, D. G. 2007. Classification of Urban and Industrial Soils in the World Reference Base for Soil Resources. Journal of Soils and Sediments 7(2): 96-100. DOI: <https://doi.org/10.1065/jss2007.02.208>
- Rubiano Guzmán, M. J. 2016. Las perchas artificiales como facilitadoras de la lluvia de semillas en un área post-tala de pino (*Pinus patula*) en el Parque Forestal Embalse del Neusa (Tausa, Cundinamarca). Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias y Educación. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. 80 pp.
- Sánchez, O., E. Peters, R. Márquez-Huitzil, E. Vega, G. Portales, M. Valdez y D. Azuara (eds.). 2005. Temas sobre restauración ecológica. Diplomado en restauración ecológica. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto de Ecología, U.S. Fish & Wildlife Service, Unidos para la Conservación, A.C. Cd. Mx., México.
- Sánchez-López, A., M. C. A. González-Chávez, R. Carrillo-González, J. Vangronsveld y M. Díaz-Garduño. 2015. Wild Flora of Mine Tailings: Perspectives for use in phytoremediation of potentially toxic elements in a semi-arid region in Mexico. International Journal of Phytoremediation 17: 476-484. DOI: <https://doi.org/10.1080/15226514.2014.922922>
- Sánchez-Núñez, J. M., J. L. Macías, P. Corona-Chávez, M. Martínez-Medina, V. H. Garduño-Monroy, L. Capra, F. García-Tenorio y G. Cisneros-Máximo. 2015. Rompimiento y desborde de presas de jales: el caso de estudio de Tlalpujahua (27 de mayo de 1937). Ciencia Nicolaita 56: 95-199.
- Sanderson, J. y L. D. Harris. 2000. The Ecology in Landscape Ecology. In: Sanderson J. y L. D. Harris (eds.). Landscape Ecology. A Top-Down Approach. Lewis Publishers. Boca Raton, USA. Pp. 59-72. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429148996>
- Santoyo Martínez, M. 2016. Bioacumulación, daño genotóxico y cambios en la morfología foliar de *Acacia farnesiana* en los jales de Huautla, Morelos. Tesis de maestría en Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación. Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, México. 63 pp.
- Santoyo-Martínez, M., P. Mussali-Galante, I. Hernández-Plata, L. Valencia-Cuevas, A. Flores-Morales, L. Ortiz-Hernández, F. Ramos-Quintana y E. Tovar-Sánchez. 2020. Heavy metal bioaccumulation and morphological changes in *Vachellia campechiana* (Fabaceae) reveal its potential for phytoextraction of Cr, Cu, and Pb in mine tailings. Environmental Science and Pollution Research 27: 11260-11276. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07730-7>
- Sarkar, B., H. Wijesekara, S. Mandal, M. Singh y N. S. Bolan. 2018. Characterization and Improvement in Physical, Chemical, and Biological Properties of Mine Wastes. In: Bolan, N. S., M. B. Kirkham y Y. S. Ok (eds.). Spoil to Soil Mine Site Rehabilitation and Revegetation. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton, USA. Pp. 3-14.
- Saunders, D. A., R. H. Hobbs y P. R. Erlich (eds.). 1993. Nature Conservation 3. The reconstruction of fragmented ecosystems. Surrey Beatty and Sons. Pty limited, Chipping Norton, Australia. 326 pp.
- Sayre, R., E. Roca, G. Sedaghatkish, B. Young, S. Keel, R. L. Roca y S. Sheppard. 2000. Nature in Focus, Rapid Ecological Assessment. The Nature Conservancy. Island Press. Washington D.C., USA. 183 pp.
- Science Task Force for the UN Decade on Ecosystem Restoration. 2021. Science-based ecosystem restoration for the 2020s and beyond. International Union for Conservation of Nature. Gland, Switzerland. 60 pp.
- SEMARNAT. 2004. NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 13 de septiembre de 2004. [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=661988&fecha=13/09/2004](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=661988&fecha=13/09/2004)
- SEMARNAT. 2007. NORMA Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. Cd. Mx., México. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4964569&fecha=02/03/2007#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4964569&fecha=02/03/2007#gsc.tab=0)
- SEMARNAT. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-155-SEMARNAT-2007, Que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.



- Diario Oficial de la Federación. Cd. Mx., México. [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5128126&fecha=15/01/2010](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5128126&fecha=15/01/2010)
- SEMARNAT. 2011. NORMA Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009, Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. Cd. Mx., México. <https://www.gob.mx/profepa/documentos/norma-oficial-mexicana-nom-157-semarnat-2009>
- SEMARNAT. 2012. NORMA Oficial Mexicana NOM-120-SEMARNAT-2011, Que establece las especificaciones de protección ambiental para las actividades de exploración minera directa, en zonas agrícolas, ganaderas o eriales y en zonas con climas secos y templados en donde se desarrolle vegetación de matorral xerófilo, bosque tropical caducifolio, bosques de coníferas o encinos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario oficial de la Federación. Cd. Mx., México. <https://www.gob.mx/profepa/documentos/norma-oficial-mexicana-nom-120-semarnat-2011>
- SEMARNAT. 2016. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde. Edición 2015. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Cd. Mx., México. [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15\\_completo.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf)
- SEMARNAT. 2021. Decreto por el que se aprueba el Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados 2021-2024. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial. Cd. Mx., México. 29 pp. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5634655&fecha=05/11/2021#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634655&fecha=05/11/2021#gsc.tab=0)
- SEMARNAT. 2022. Inventario homologado preliminar de presas de jales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://geomaticaportal.semarnat.gob.mx/arcgis/apps/webappviewer/index.html?id=95841aa3b6534cdfbe3f53b3b5d6edfa> (Consultado agosto de 2022).
- SER. 2004. Principios de SER International sobre la restauración ecológica. Society for Ecological Restoration (SER). Washington D.C., EUA. 15 pp. <https://www.ser-rrc.org/resource/the-ser-international-primer-on/> (consultado agosto de 2022).
- SER. 2019. Principios y estándares Internacionales para la Práctica de la restauración ecológica. Society for Ecological Restoration (SER). Washington D.C., EUA. 113pp. <https://www.ser.org/page/Publications> (consultado agosto de 2022).
- Severns, P. M. 2011. Habitat restoration facilitates an ecological trap for a locally rare, wetland-restricted butterfly. *Insect Conservation and Diversity* 4(3): 184-191. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-4598.2010.00120.x>
- Siebe, Ch., R. Jahn y K. Stahr. 2016. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México- Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung, Universidad de Halle, Alemania- Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Universidad de Hohenheim, Alemania. Hohenheim, Alemania. 58 pp.
- Simberloff, D. 2012. Risks of biological control for conservation purposes. *BioControl* 57: 263-276. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10526-011-9392-4>
- Simberloff, D. y P. Stiling. 1996. How risky is biological control? *Ecology* 77: 1965-1974. DOI: <https://doi.org/10.2307/2265693>
- Simberloff, D., J. L. Martin, P. Genovesi, V. Maris, D. A. Wardle, J. Aronson, F. Courchamp, B. Galil, E. García-Berthou, M. Pascal, P. Pysek, R. Sousa, E. Tabacchi y M. Vila. 2013. Impacts of biological invasions: what's what and the way forward. *Trends in Ecology & Evolution* 28(1): 58-66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.07.013>
- Sipriano Morales, J. A. 2016. Impactos de la Minería Canadiense en México: Los Casos de Peñasquito en Zacatecas y Los Filos en Guerrero (2005-2013). Tesis de licenciatura en Estudios Latinoamericanos. Colegio de Estudios Latinoamericanos, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F., México. 112 pp.
- Skipin, L., E. Gaevaya, E. Zaharova, V. Petukhova y K. Sidorova. 2016. Biogeochemistry of heavy metals in trophic chain in terms of the south of Tumen region. *Procedia Engineering* 165: 860-868. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.785>
- Smith-Ramírez, C., G. Williams-Linera, R. F. del Castillo, N. Ramírez-Marcial, R. Aguilar, N. Taylor-Aquino, D. Golicher, P. Becerra, C. Echeverría, J. L. Celis-Diez y J. J. Armesto. 2011. Fragmentation and altitudinal effects on tree diversity in Seasonally dry forests of Mexico and Chile. In: Newton, A.C. y N. Tejedor (eds.). *Principles and Practice of Forest Landscape Restoration: Case studies from the drylands*

- of Latin America. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN). Gland, Switzerland. xxvi + 383 pp.
- SMG. 2019. Información ciudadana sobre jales. Servicio Geológico Mexicano Gobierno de México. <https://www.gob.mx/sgm/articulos/informacion-ciudadana-sobre-jales?idiom=es> (consultado agosto de 2019).
- Stromberg, J. C., M. K. Chew, P. L. Nagler y E. P. Glenn. 2009. Changing Perceptions of Change: The Role of Scientists in *Tamarix* and River Management. *Restoration Ecology* 17(2): 177-186. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2008.00514.x>
- Suh, J., S. Kim, H. Yi y Y. Choi. 2017. An overview of GIS-Based modeling and assessment of mining-induced hazards: Soil, water, and forest. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14(12): 1463. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph14121463>
- Tamayo, L. 2014. La minería de tajo a cielo abierto en México: una nueva forma de colonialismo. *Nómadas. Revista Crítica de Ciencias Sociales y Jurídicas* 44(4): 1-17. DOI: [https://doi.org/10.5209/rev\\_NOMA.2014.v44.n4.49291](https://doi.org/10.5209/rev_NOMA.2014.v44.n4.49291)
- Temperton, V. M., R. J. Hobbs, T. Nuttle y S. Halle (eds.). 2004. Assembly rules and restoration ecology: Bridging the gap between theory and practice. Society for Ecological Restoration International. Island Press. Covelo, USA. 424 pp.
- Tózsér, D., T. Magura y E. Simon. 2017. Heavy metal uptake by plant parts of willow species: A meta-analysis. *Journal of Hazardous Materials* 336: 101-109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.03.068>
- Tovar-Sánchez, E., L. T. Cervantes, C. Martínez, E. Rojas, M. Valverde, M. L. Ortiz-Hernández y P. Mussali-Galante. 2012. Comparison of two wild rodent species as sentinels of environmental contamination by mine tailings. *Environmental Science Pollution Research* 19(5): 1677-1686. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0680-4>
- Treweek, J. 1999. *Ecological Impact Assessment*. Blackwell Science. Cornwall, UK. 368 pp.
- Turrión, D., L. Morcillo, J. A. Alloza y A. Vilagrosa. 2021. Innovative Techniques for Landscape Recovery after Clay Mining under Mediterranean Conditions. *Sustainability* 13(6): 3439. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13063439>
- Uc Peraza, R. G. 2014. Metales pesados en el mejillón *Mytilus californianus* (Conrad 1937) de la costa oeste de Baja California: variación espacial y temporal. Tesis de Maestría en Ciencias en Oceanografía Costera. Posgrado en Oceanografía costera. Facultad de Ciencias Marinas, Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Ensenada, Baja California, México. 125 pp.
- USEPA. 1991. Site characterization for subsurface remediation. Center for Environmental Research Information Office of Research and Development. Cincinnati, USA. 259 pp. <https://www.epa.gov/ust/seminar-publication-site-characterization-subsurface-remediation>. (consultado agosto de 2019)
- Valdez-Hernández, M., R. Gil-Medina, J. O. López-Martínez, N. Torrecano-Valle, N. Cabanillas-Terán y G. A. Islebe. 2019. Succession and the Relationship between Vegetation and Soil in the Marl Quarries of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Forests* 10(2): 116. 13 pp. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10020116>
- Valladares, F., L. Balaguer, I. Mola, A. Escudero y V. Alfaya (eds.) 2011. Restauración ecológica de áreas afectadas por infraestructuras de transporte. Bases científicas para soluciones técnicas. Fundación Biodiversidad. Madrid, España. 323pp.
- van Riper III, C., K. L. Paxton, C. O'Brien, P. B. Shafroth y L. J. McGrath. 2008. Rethinking avian response to *Tamarix* on the lower Colorado River: A threshold hypothesis. *Restoration Ecology* 16(1): 155-167. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2007.00354.x>
- Vargas Mergold, A. V. 2016. La empresa metalúrgica Industrial Minera México en San Luis Potosí. Problemas ambientales con soluciones incoherentes. Tesis de doctorado en Ciencias Sociales. El Colegio de San Luis, A.C. San Luis Potosí, México. 253 pp.
- Vick, S. G. 1990. *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*. Segunda edición. BiTech Publishers LTD. Vancouver, B.C., Canada. 369 pp. DOI: <https://doi.org/10.14288/1.0394902>
- Volke Sepúlveda, T. L. y J. A. Velasco Trejo. 2002. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Cd. Mx., México. 62 pp.
- Volke, T., J. A. Velasco y D. A. De la Rosa. 2005. Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales- Instituto Nacional de Ecología. Cd. Mx., México. 141 pp.





- Walls, G. 1999. Rapid assessment of ecological condition and trend of conservation areas in Hawke's Bay. Department of Conservation. Wellington, New Zealand. 12 pp.
- Wang, D., X. Ji, C. Li, y Y. Gong. 2021. Spatiotemporal Variations of Landscape Ecological Risks in a Resource-Based City under Transformation. *Sustainability* 13: 5297. 1-21. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13095297>
- Wardle, D. A. 2010. Chapter 12. Trophic Cascades, Aboveground–Belowground Linkages, and Ecosystem Functioning. In: Terborgh, J. y J.A. Estes (eds). *Trophic Cascades: Predators, Prey, and the Changing Dynamics of Nature*. Island Press All. NW, Washington, DC., USA. Pp. 203-218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.baee.2011.04.001>
- Xiong, X., D. C.W. Tsang y Y. S. Ok. 2018. Chemical Characterization of Mine Sites. In: Bolan, N. S., M. B. Kirkham y Y. S. Ok (eds). 2018. *Innovative Techniques for Landscape Recovery after Clay Mining under Mediterranean Conditions*. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton, USA. Pp. 17-32. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13063439>
- Young, B., G. Sedaghatkish y R. L. Roca. 2000. Chapter 6. Fauna Surveys. In: Sayre, R., E. Roca, G. Sedaghatkish, B. Young, S. Keel, R. L. Roca y S. Sheppard (eds.). *Nature in Focus, Rapid Ecological Assessment*. The Nature Conservancy. Island Press. Washington, DC, USA. 183 pp.
- Zahawi, R. A., K. D. Holl, R. J. Cole y J. L. Reid. 2013. Testing applied nucleation as a strategy to facilitate tropical forest recovery. *Journal of Applied Ecology* 50(1): 88-96. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12014>
- Zaller, J. G y C. A. Brühl. 2019. Editorial: Non-target effects of pesticides on organisms inhabiting agroecosystems. *Frontiers in Environmental Science* 7: 75. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00075>
- Zetina Rodríguez, M. C. 2012. La historia de un tesoro que se convirtió en un desastre ambiental, la Zacatecana, ejido de Guadalupe, Zacatecas. *Revista de El Colegio de San Luis, Nueva Época* 4(6): 160-194. <https://biblat.unam.mx/hevila/RevistadeelColegiodeSanLuis/2012/no4/6.pdf> (consultado agosto de 2019).
- Zhang, C. C. 2007. *Fundamentals of environmental sampling and analysis*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, USA. 436 pp. DOI: <https://doi.org/10.1002/0470120681>

