

Procedimiento para la rehabilitación ambiental de las minas abandonadas. Aplicación a minas de recursos pétreos en la comunidad de San Pablo Autopan, Estado de México

Procedure for the environmental rehabilitation of abandoned mines. Application to the stone resource mines in the community of San Pablo Autopan, Estado de México

Edgar Mondragón de Jesús¹, Daniel Fernando Gómez Benítez^{1*}, Alexis Ordaz Hernández¹ y Fernando Sánchez Carmona¹

¹ Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, Paseo Universidad, Toluca de Lerdo, México. CP. 50110. Tel. 722 215 0255. garis1506@gmail.com, ferx.geouaemex@gmail.com, aordazh@uaemex.mx, fer.sanchez.cc@gmail.com

*Autor de correspondencia

Resumen

La investigación se enfoca en proponer un procedimiento para la rehabilitación de minas de materiales pétreos abandonadas. El procedimiento es aplicable a diferentes contextos geográficos donde se desee restaurar bajo una perspectiva ecológica. En este trabajo se realiza la aplicación del procedimiento a las minas de San Pablo Autopan, Estado de México. Se inicia con la investigación documental, que permitió el análisis de la información y la colecta de datos cartográficos que contenía información geológico-ambiental y ecológica del sitio. Además, se valoran indicadores físicos, sociales y normativos (normatividad ambiental vigente para cada país). Se propuso un uso recreativo para el sitio afectado, donde se pueden realizar actividades de esparcimiento como el senderismo y actividades deportivas. La aplicación de la propuesta en minas abandonadas de la comunidad de San Pablo Autopan podría reducir la disposición inadecuada de residuos sólidos urbanos y los subsecuentes impactos negativos al medio ambiente.

Palabras clave: Rehabilitación ambiental; minería; pasivo ambiental.

Abstract

This research focuses on proposing a procedure for the rehabilitation of abandoned mines of stone materials. The procedure is applicable to different geographical contexts where restoration from an ecological perspective is needed. In this work such procedure is applied to the mines of San Pablo Autopan, Estado de México. It begins with documentary research, which allowed the analysis of the information and the collection of cartographic data containing geological-environmental and ecological information of the site. In addition, physical, social, and regulatory indicators are assessed (current environmental regulations for each country). A recreational use was proposed for the affected site, where people can practice recreational activities, such as hiking and sports. The application of the proposal in the abandoned mines of the San Pablo Autopan community could reduce the inadequate disposal of municipal solid waste and its subsequent negative impact on the environment.

Keywords: Environmental rehabilitation; mining; environmental liabilities.

Recibido: 10 de octubre de 2023

Aceptado: 11 de diciembre de 2023

Publicado: 20 de marzo de 2024

Cómo citar: Mondragón de Jesús, E., Gómez Benítez, D. F., Ordaz Hernández, A., & Sánchez Carmona, F. (2024). Procedimiento para la rehabilitación ambiental de las minas abandonadas. Aplicación a minas de recursos pétreos en la comunidad de San Pablo Autopan, Estado de México. *Acta Universitaria* 34, e4029. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2024.4029>

Introducción

La exploración y explotación minera envuelven un riesgo latente que amenaza al suelo, aire, agua, flora y fauna. Los daños ecológicos producidos por la actividad minera desencadenan importantes conflictos sociales (Galindo, 2015). La minería de recursos pétreos, y en específico la de cielo abierto, es importante desde el punto de vista económico de un país, ya que es fundamental en la industria de la construcción y en otras industrias relacionadas con infraestructura urbana. Sin embargo, cuando se abandona una mina a cielo abierto, se genera la mayoría de las veces un pasivo ambiental. La extracción de materiales pétreos, por ejemplo en el Estado de México, produce sobre la naturaleza un impacto significativo (Gobierno Municipal de Toluca 2022-2024, 2022). Resulta necesario analizar si el impacto positivo (como el incremento económico) se justifica ante el impacto negativo, el cual suele ser agresivo y no siempre la naturaleza es capaz de asimilarlo, produciendo un daño irreparable al ambiente, lo que afecta de diversas formas a la flora y fauna endémica de las zonas explotadas (Montes de Oca–Pérez & Rosario–Ferrer, 2014).

De ahí surge la necesidad de contemplar administrativamente y en rubros de contabilidad el cierre de una mina, y que se lleven a fin las propuestas de recuperación ambiental de ese pasivo ambiental. Olivera *et al.* (2019), en su ponencia *Los escasos aportes de la minería al desarrollo del país* en las Jornadas sobre Minería y Extractivismo (25 de mayo 2019), demuestra cómo en México, frente a un marco regulatorio minero pobre y que favorece a las grandes empresas, el gobierno y las empresas han construido una narrativa ideológica de la minería como promotora del desarrollo económico con poco sustento en la realidad; ya que señala que en 2016 la minería metálica y no metálica aportaron sólo el 0.32% de las entradas totales recaudadas por el Gobierno Federal. El autor señala también el escaso aporte de la industria a las finanzas públicas nacionales en 2017, 2018 y 2019, con 0.35%, 0.56% y 0.52%, respectivamente. De acuerdo con Orozco-Martínez & Rodríguez-Gámez (2022) y Marroquín-Castillo *et al.* (2017) (2019), al concluir las actividades de extracción, los territorios quedan saqueados, destruidos, sin financiamiento para hacer frente a los pasivos ambientales generados y sin ninguna propuesta de desarrollo alterno del gobierno mexicano. Para estos autores, el desarrollo de las actividades extractivas propias de la minería carece de compatibilidad con la sustentabilidad ambiental de México.

En particular, para la comunidad de San Pablo Autopan, una preocupación latente es la generación de pasivos ambientales que, a largo plazo, detonan mayor contaminación del lugar y generan basureros no reglamentados. Las minas de San Pablo Autopan se localizan al norte de la cabecera municipal de Toluca, a una distancia aproximada de 9.3 km (Figura 1). En estas minas se extrae principalmente recursos pétreos como cantera y roca. La actividad minera constituye la principal fuente de empleo para la mayoría de los habitantes de la zona debido a la distancia y a la tradición familiar.

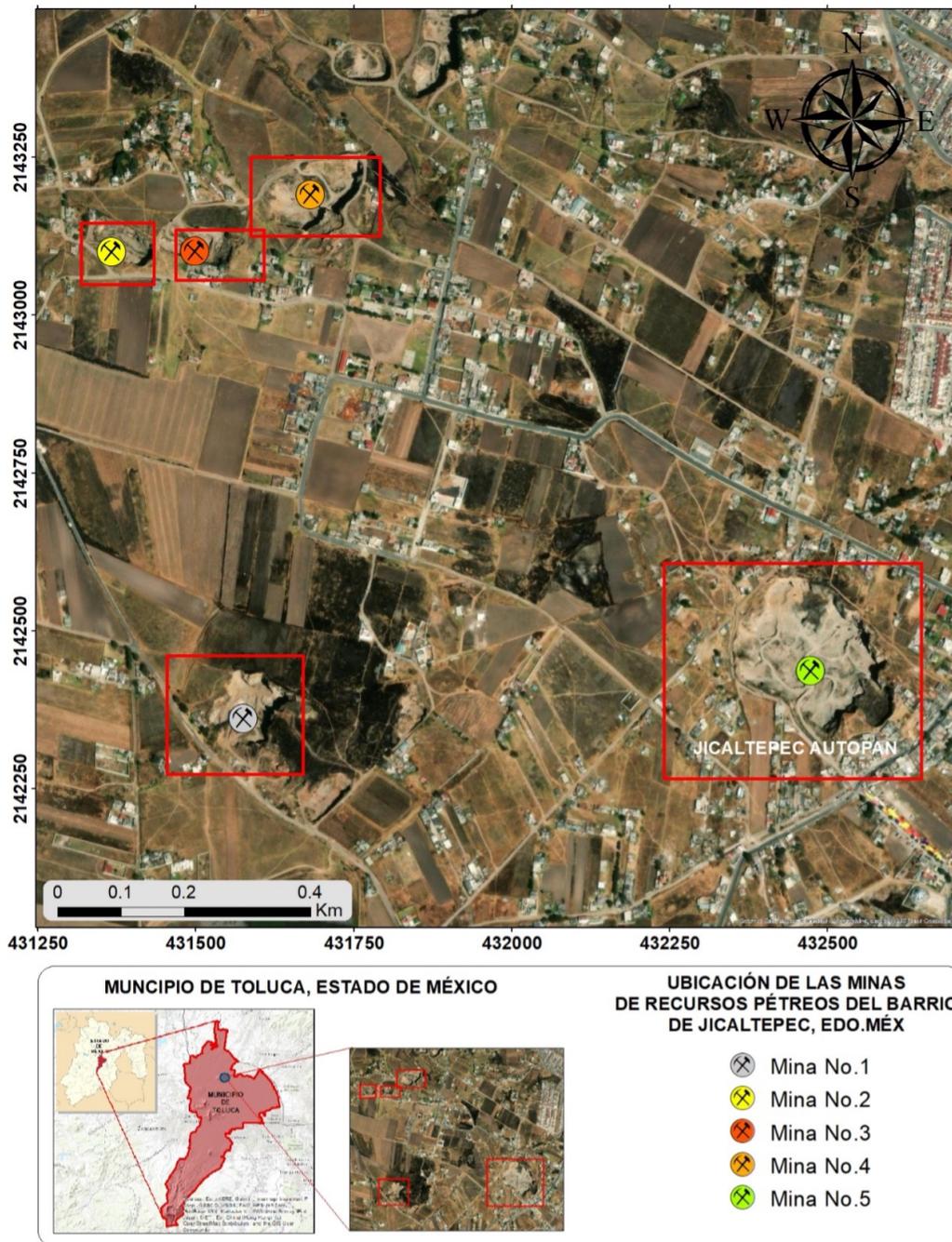


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

Existen varias propuestas de rehabilitación ambiental de minas de recursos pétreos que se han llevado a cabo con éxito a nivel internacional y nacional (Ordoñez-Ruiz & Espinoza-Aguilar, 2019; Torres-Batista *et al.*, 2019a, 2019b). Algunas propuestas de rehabilitación en los alrededores de la ciudad de Toluca se pueden consultar en Azamar-Alonso (2015), Canales-Lauro & Aguiluz-León (2021) y Silvia-Ontiveros (2021). La rehabilitación de espacios degradados, y en este caso de los tajos abiertos de minas de recursos pétreos, está determinada tanto por los aspectos técnicos como por circunstancias históricas, culturales, políticas, legales y estéticas.

La propuesta de la restauración que se propone en este estudio estará basada en un estudio geológico ambiental y en el análisis de aspectos sociales, económicos y legales relacionados con la restauración de minas a cielo abierto en México, con la finalidad de que esté acorde al contexto socioeconómico y ambiental de Toluca.

Principales elementos teóricos

En este apartado se discutirán los principales aspectos ambientales y normativos vinculados con la actividad minera, especialmente con aquella que está asociada a la extracción de materiales pétreos que son de gran importancia para el desarrollo constructivo. Antes, se sugiere consultar elementos relacionados con la clasificación de los yacimientos minerales en Moon *et al.* (1995), Eckstrand (1977), Noetstaller (1998) y Ousmanou *et al.* (2023); y en relación con el procedimiento de extracción de éstos, se puede encontrar información en Reina-Jiménez (2013).

Impacto ambiental de las actividades mineras de los recursos pétreos

El impacto ambiental es definido como el efecto que produce la actividad humana sobre el medio ambiente. La actividad minera de los recursos pétreos es una actividad económica humana y, por ello, tendrá un impacto ambiental. Los recursos pétreos, para este caso, se obtienen a través de minería a cielo abierto, misma que ocasiona un impacto ambiental mucho mayor que la minería subterránea, en parte por la necesidad de remover mayores volúmenes de roca y por el aumento de residuos (Hernández-Jatib *et al.*, 2011).

Al desarrollar una obra de tajo abierto, la capa de suelo natural que permanecía intacta queda alterada irreversiblemente, los cuerpos de agua subterránea y los efluentes de agua próximos pueden resultar afectados negativamente, haciendo peligrar la fauna y flora endémica, aunado a que el proceso de arrastre y depósito sedimentario de los propios efluentes de la actividad pueden perjudicar a la agricultura al erosionar y restar fertilidad a las superficies de cultivo (Bastidas-Orrego *et al.*, 2018; Fernández-Muerza, 2007). Adicionalmente, Bernache-Pérez (2012) resalta otro impacto ambiental que genera la actividad minera de recursos pétreos, en este caso, el generado por la proximidad de las canteras a los núcleos de población semi-urbanos que producen problemas al medio ambiente, pues las excavaciones se convierten en vertederos urbanos conforme se urbaniza una zona. También ocurren emisiones de polvo y partículas de diámetro equivalente al limo en suspensión provenientes de dichas explotaciones, las cuales afectan a los habitantes de las viviendas cercanas a la zona de la actividad minera.

A continuación, se listan otros tipos de impactos ambientales identificados por Ozelik (2022):

- a) El impacto sobre la salud humana con enfermedades respiratorias o del sistema nervioso, generadas por emisiones gaseosas, partículas tamaño limo en suspensión, ruidos y vibraciones causados por la maquinaria y las explosiones.
- b) El impacto sobre procesos geomorfológicos por aumento de la inestabilidad de los taludes, detonando deslizamientos, especialmente durante lluvias intensas. También ocurre alteración de drenajes que modifican el cauce de aguas pluviales y aumento de la erosión debido a la poca presencia de árboles.

Normatividad ambiental en actividades mineras de los recursos pétreos

Normatividad nacional

En México, la regulación de la actividad minera se encuentra ampliamente cubierta, existen especificaciones a seguir en cada una de las etapas de explotación minera y se establecen recursos legales para cada uno de los diversos impactos al ambiente que ésta puede causar. La normatividad nacional tiene como objetivo que la industria minera cumpla regulaciones ambientales que le permitan mantener un ambiente de calidad, con impacto mínimo sobre el medio natural y sin perjudicar el desarrollo económico del país. Las instituciones en México que están involucradas con las regulaciones de los recursos pétreos son: la Secretaría de Economía (SE), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa) y la Secretaría de Salud (SS). Estas dependencias son encargadas de que se cumplan las leyes, reglamentos y normas que estén ligadas a la actividad minera de los recursos pétreos. A continuación, se muestra un listado resumido por dependencias y las leyes en materia ambiental que les competen y que afectan la actividad minera en México (Tabla 1).

Tabla 1. Resumen de normatividad relacionadas a la actividad minera de recursos pétreos en México.

Legislación en materia ambiental	Principales aspectos vinculados a la actividad minera de recursos pétreos
NORMA Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011, Contaminación atmosférica-Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición.	<i>"Establecer los niveles máximos permisibles de emisión de humo, partículas, monóxido de carbono (CO), bióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NOx) de los equipos de combustión de calentamiento indirecto que utilizan combustibles convencionales o sus mezclas, con el fin de proteger la calidad del aire"</i> (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2011).
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Título Primero, Capítulo I, Artículo 3, Inciso XXI.	Define como Manifestación del Impacto Ambiental: <i>"El documento mediante el cual se da a conocer, con base en estudios, el impacto ambiental, significativo y potencial que generaría una obra o actividad, así como la forma de evitarlo o atenuarlo en caso de que sea negativo"</i> (Cámara de Diputados del H. Congreso de La Unión, 2012).
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Título Primero, Capítulo I, Artículo 3, Inciso XXXIV.	Define como Restauración: <i>"Conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales"</i> (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2012).
Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.	<i>"Tiene por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación"</i> (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2015).
Ley de Minería. Artículo 5.	La ley de Minería no aplica, entre otros, para: <i>"Los productos derivados de la descomposición de las rocas, cuando su explotación se realice por medio de trabajos a cielo abierto"</i> (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2023). Este dato es relevante, se infiere a que no existe un marco legal a nivel Federal exclusivo para la minería relacionada con materiales para la construcción. Como consecuencia se aplican los instrumentos legales citados anteriormente o las leyes de alcance Estatal, por ejemplo, en este caso la Ley de Desarrollo sustentable y Protección al Ambiente del Estado de México y algunas normas que se explican en el siguiente apartado.
Ley de Desarrollo sustentable y Protección al Ambiente del Estado de México.	Entre sus objetivos tiene: <i>"Regular el aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso la restauración de los elementos naturales, de manera que sea compatible la obtención de beneficios económicos con la preservación de los ecosistemas"</i> (Cámara de Diputados de la H. LIII Legislatura del Estado, 1997).

Fuente: Elaboración propia con base en la legislación minera vigente.

Normatividad en el Estado de México

En el Estado de México existe una actividad minera importante para los recursos pétreos y esto se puede constatar en el directorio de minas del Estado de México elaborado por IFOMEGEM (2019), donde se hace un compilado dinámico de las minas activas en el territorio. De acuerdo con el mismo IFOMEGEM, actualmente en el Estado de México se encuentran registradas y activas alrededor de 50 minas de explotación de materiales pétreos. Lo anterior reafirma la relevancia en materia normativa para la entidad.

La norma técnica estatal ambiental NTEA-002-SMA-DS-2009 (Gaceta del Gobierno del Estado de México, 2010) regula la exploración, explotación y transporte de minerales no concesionables en el Estado de México. Esta norma sugiere el establecimiento de una zona de amortiguamiento alrededor de los sitios de explotación minera, ya que coadyuvará en el monitoreo oportuno de acciones no previstas y permitirá acciones de mitigación ante los impactos negativos de dicha actividad.

En la norma NTEA-002-SMA-DS-2009 (Gaceta del Gobierno del Estado de México, 2010), también se indica lo siguiente:

Para la autorización de apertura o exploración de nuevas minas, se acatará lo que determine la autoridad, con base en lo establecido en el Código, Reglamentos e Instrumentos de Política Ambiental y la presente Norma, sin perjuicio de las facultades que le confiere al municipio el Libro Quinto del Código Administrativo del Estado de México.

Se prohíbe la apertura de minas o su ampliación en áreas naturales protegidas, salvo las excepciones que establezca la Norma con base a lo estipulado en los decretos de creación, programas de manejo y a lo que determine la evaluación del impacto ambiental.

La explotación de minas de minerales no concesionables se deberá ubicar en zonas compatibles con el uso de suelo que determine el Plan de Desarrollo Urbano Municipal.

Minas abandonadas como pasivos ambientales

La minería tanto de recursos minerales metálicos como de recursos pétreos influye en el desarrollo socioeconómico de los países, especialmente en los ámbitos de la construcción, automotriz, química, tecnología, agrícola, etc. En la época colonial y hasta principios e incluso mediados del siglo XX, la actividad minera en México no estaba regulada ambientalmente, lo que propició que actualmente se sigan reparando daños. Sin embargo, la tendencia actual transita por el establecimiento de regulaciones ambientales que estén concebidas como parte de la cadena del negocio minero y como parte indisoluble de la parte administrativa y contable de los proyectos.

A partir de "vacíos" legales o falta de rigurosidad en la aplicación de la normatividad, algunos proyectos no concluyen con un cierre de minas óptimo, generando espacios degradados (Valencia-García, 2022). Un espacio degradado es una situación no óptima en aspectos ecológicos, sociales y otros de índole ambiental cuando se compara con otra área similar desde el punto de vista geológico ambiental y que no está alterada (Aguilera *et al.*, 2020). Algunos parámetros para evaluar el espacio degradado transitan por indicadores ecológicos, productivos, culturales, sociales y de impacto ambiental sobre las unidades del paisaje (Rivera-Pabón & Senna, 2017).

Los estudios realizados sobre aspectos ambientales aplicados a la minería son escasos en México, y esto es sorprendente a pesar de la importancia y amplitud de la industria minera en el país y de los impactos negativos que ésta puede generar sobre los ecosistemas (Hernández-Acosta *et al.*, 2009).

La restauración ambiental, de acuerdo con Younger *et al.* (2004) y la Dirección Nacional de Vialidad (2014), es un proceso que puede desarrollarse de manera casi simultánea al proceso de extracción del material (canteras o minas de pétreos) y la recuperación se verá influenciada por la resiliencia natural del ecosistema para regresar a condiciones similares a las que ostentaba antes de la perturbación.

Así mismo, la restauración ambiental tendría como objetivo final la oportunidad de regresar el suelo fértil, especies nativas, semillas, estacas, etc. Sin embargo, en ocasiones la recuperación no ocurre de forma espontánea o requeriría de un tiempo prolongado. Lo anterior ha conllevado a propuestas de medidas como el restablecimiento de cobertura vegetal en conjunto con la adaptación de la topográfica para favorecer el desarrollo del suelo y el crecimiento de las raíces y otras formas biológicas. La Tabla 2 muestra ejemplos aplicados en Argentina.

Tabla 2. Tipos de rehabilitación en minas de recursos pétreos.

Tipo de uso	Características	Aspectos Necesarios
Agrícola	<ul style="list-style-type: none"> - Plantación de Frutales. - Pastizales. - Forrajes. - Vides. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pendientes suaves. - Sistema de drenaje. - Suelo fértil bien reconstituido. - Tipo de cultivo adaptado a la disponibilidad de agua y características del suelo.
Forestal	<ul style="list-style-type: none"> - Plantación de árboles para la explotación de madera. - Incremento de la biodiversidad, mitigación de la erosión, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pendientes moderadas. - Suelo fértil bien reconstituido. - Sistema de drenaje. - Selección de especies.
Hábitat Natural	<ul style="list-style-type: none"> - Recuperación del entorno natural o creación de nuevo hábitat. - Reserva de flora y fauna. 	<ul style="list-style-type: none"> - Suelo fértil bien reconstituido. - Selección de especies. - Modelado de orillas y hueco.
Actividades recreativas	<ul style="list-style-type: none"> - Senderismo e interacción con la naturaleza. - Observatorio de especies o área de interés geológico. - Caza o pesca. - Deportes Náuticos. - Campos para la práctica deportiva. - Aeródromos. - Parque zoológico. - Jardín Botánico. - Museo relacionado con la actividad minera. 	<ul style="list-style-type: none"> - Estabilidad de los taludes. - Creación de accesos. - Proximidad a núcleos urbanos. - Medias de seguridad para los usuarios.
Urbanismo	<ul style="list-style-type: none"> - Urbanizaciones. - Parques y zonas verdes. - Auditorios, iglesias, bodegas, entre otros. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pendientes suaves. - Buenas propiedades geotécnicas del suelo rehabilitado (cimentaciones).
Industrial	<ul style="list-style-type: none"> - Suelo para establecimiento de polígonos industriales. - Aparcamientos. - Depósito de agua. 	<ul style="list-style-type: none"> - Accesos. - Proximidad a núcleos urbanos. - Medidas de seguridad para los usuarios.
Vertedero de residuos	<ul style="list-style-type: none"> - Almacenamiento controlado de residuos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Infraestructuras (líneas, eléctricas, alcantarillado, agua potable carretera de acceso). - Buen acondicionamiento y sellado.

Fuente: Elaboración propia con base en Gobierno de la Rioja (2009).

La restauración ambiental tiene tiempos variables de acuerdo con su capacidad de resiliencia ecológica. Es un proceso largo, y los resultados pueden comenzar a observarse después de varios años; es también importante considerar la valoración económica del proyecto de restauración. En México, la Cámara Minera de México (Camimex) ya contempla la restauración ecológica en minas abandonadas como recomendación para evitar que se genere un pasivo ambiental y plantea el remodelado de las formas minadas y la instauración de una cubierta vegetal, esto para lograr que se instauren las condiciones adecuadas ecológicas para que el suelo sea capaz de desarrollar las especies vegetales elegidas en cada caso (Delgado, 2023).

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio seleccionada para aplicar el procedimiento de rehabilitación ambiental para minas a cielo abierto abandonadas, en este caso, consistió en las minas de recursos pétreos de la comunidad San Pablo Autopan, perteneciente al municipio de Toluca, Estado de México. En específico, las minas a cielo abierto que se estudiarán corresponden al barrio Jicaltepec Autopan. Las coordenadas centrales del sitio se ubican en el paralelo 19° 21' 24" latitud norte y el meridiano 99° 39' 31" longitud oeste (Figura 1). El barrio Jicaltepec Autopan se ubica al norte de la cabecera municipal, a una distancia aproximada de 9.3 km.

El municipio se enmarca en terrenos aptos para el desarrollo urbano; no obstante, existen zonas que presentan características físicas que limitan este uso en razón de la topografía. Según indica el Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Toluca (Gobierno Municipal de Toluca 2022-2024, 2022), las localidades de San Pablo Autopan son de las zonas en el Municipio de Toluca con el mayor número de viviendas con piso de tierra, situación que demuestra el nivel de precariedad de sus habitantes. Las formaciones edáficas de la zona no ofrecen aptitud para uso agrícola.

Para el diseño del procedimiento de rehabilitación ambiental (PRA) de las minas a cielo abierto del barrio Jicaltepec Autopan (objetivo de esta investigación), se empleó la investigación documental. El trabajo transitó por la elaboración de fichas bibliográficas, el análisis de la información y la colecta de datos cartográficos que reflejan los antecedentes geológico-ambientales, sociales, económicos y ecológicos de la zona de estudio. Además, se realizó el análisis de las leyes y reglamentos en materia ambiental de recursos pétreos aplicables al área de trabajo. Y se toma como ejemplo un estudio de caso exitoso de restauración de minas a cielo abierto en las cercanías de Toluca.

Previo al diseño de la PRA, se realizó un diagnóstico de las características más relevantes del sitio, con la finalidad de alcanzar una propuesta coherente con la realidad física y social de la comunidad San Pablo de Autopan, a donde pertenece el barrio Jicaltepec Autopan. De esta forma, en la Tabla 3 se plasman los elementos que sustentaron el diagnóstico, donde se relacionan los indicadores, las variables que lo describen y la fuente bibliográfica o técnica empleada para acceder a la información que sustenta cada variable.

Tabla 3. Diseño metodológico donde se describen los indicadores considerados en el diagnóstico geológico-ambiental.

Indicadores	Variables	Técnica empleada para acceder a la información
Geólogo- Geomorfológico	Litología	1. Carta geológico-minera E14-2 Escala 1:250 000 del Servicio Geológico Mexicano. Se realizó un recorte de esta carta de acuerdo con la zona de estudio (Servicio Geológico Mexicano [SGM], 2023).
	Geotecnia	1. Identificación visual de taludes mediante trabajo de campo. 2. Verificación de movimientos de remoción en masa (desprendimientos, flujos de detritos o deslizamientos en forma de cuña). 3. En caso de amenaza evidente, proponer medida de estabilización. 4. En caso de incertidumbre, se sugiere determinar el coeficiente de estabilidad (González <i>et al.</i> , 2002).
	Relieve	1. Modelo Digital de Elevación de tipo Terreno, Escala 1:10 000 Resolución de 5 m y clasificación del territorio por medio de la caracterización de pendientes (INEGI, 2020b).
Recurso hídrico	Superficial	1. Se realizó una consulta y análisis del recurso hídrico con base en la Red Hidrográfica del INEGI, Escala 1:50 000, Edición 2.0 del 2017, Región Hidrográfica Lerma-Santiago, Cuenca R. Lerma-Toluca, Subcuenca R. Otzolotepec-R. Atlacornulco (INEGI, 2023).
	Subterránea	2. Se consultaron e interpretaron la estratigrafía y niveles freáticos de pozos con fines hidrológicos cercanos al área (Expósito, 2012).
Factores Ecológicos	Uso de suelo y vegetación	1. Se consulta y analizan factores ecológicos usando como base la carta de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 Serie VI del INEGI (2017) (IGECEM, 2023).
	Edafología	1. Se analizó la caracterización edafológica del Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Toluca (Gobierno Municipal de Toluca 2022-2024, 2022) a fin de definir los tipos de suelo que predominan la zona de estudio.
Socioeconómico	Estructura Social	1. Se consideran las principales actividades económicas de la zona de estudio, tabuladas en el Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Toluca (Gobierno Municipal de Toluca 2022-2024, 2022).
	Índice de marginación	1. Se consideraron los datos contenidos en el Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Toluca (Gobierno Municipal de Toluca 2022-2024, 2022), con el objetivo de obtener un panorama de la marginación de los habitantes de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Diagnóstico de la zona de estudio

En congruencia con el diseño metodológico plasmado en la Tabla 3, a continuación se describen los aspectos más relevantes para cada indicador, los cuales fueron considerados para el diseño de un procedimiento de rehabilitación ambiental (PRA) para el caso de estudio y probablemente extrapolable a otros sitios con características físicas, sociales y de impacto ambiental similares.

Indicador geólogo-geomorfológico

La litología del lugar, de acuerdo con el mapa geológico del Estado de México (Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México, 2009), indica la presencia de rocas volcánicas del Cuaternario. La secuencia de rocas son flujos de lava, basaltos y rocas piroclásticas. El sitio en el que se encuentran emplazadas las minas a cielo abierto, que son objeto de estudio, corresponde a una litología mayormente ígnea, específicamente andesita-basalto, esto de acuerdo a la identificación directa en campo y la confrontación con la cartografía anteriormente citada (Figura 2). Dicha constitución corresponde a la actividad de los volcanes del centro de México, exactamente al eje Neovolcánico Transmexicano.

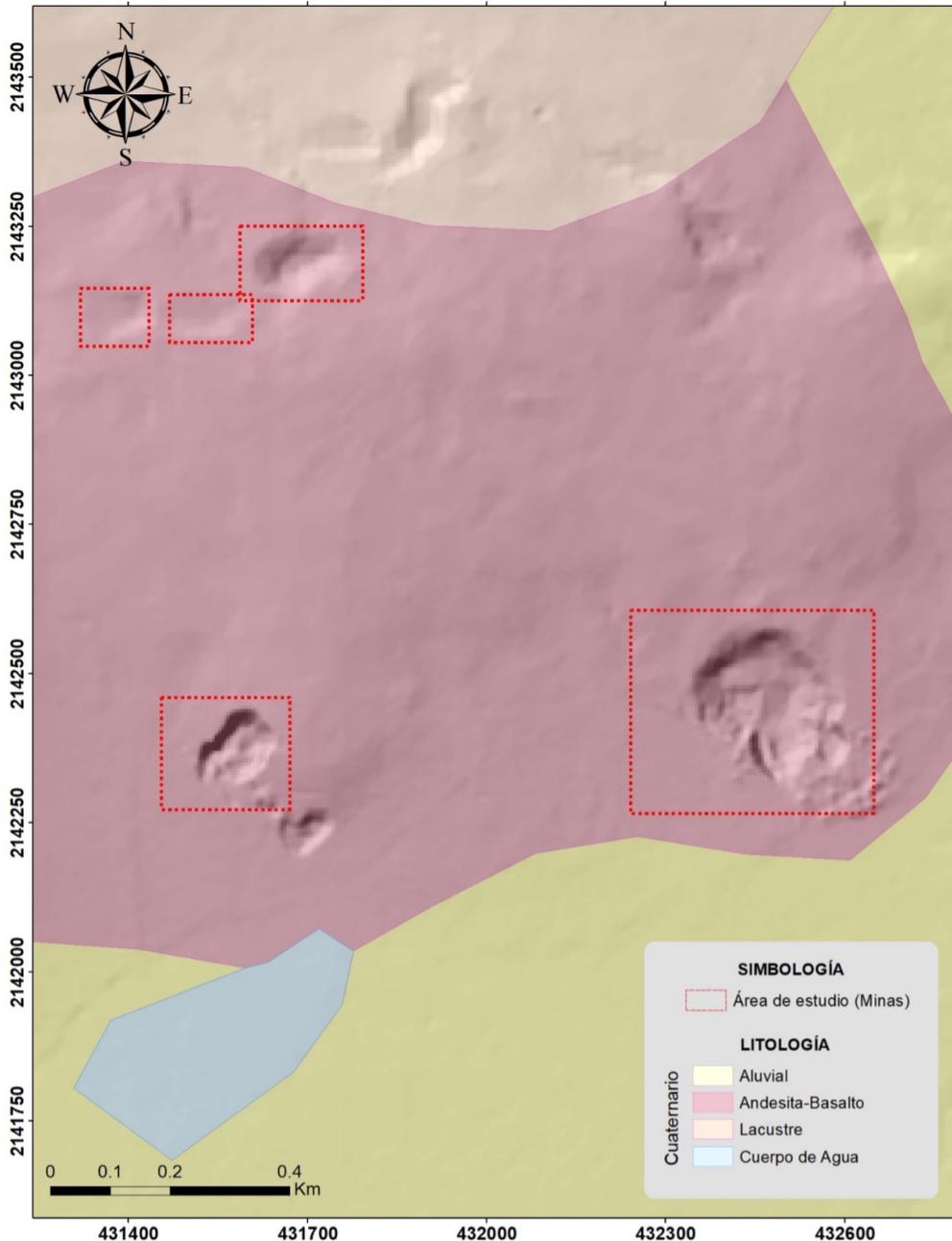


Figura 2. Geología de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia con base en datos del Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (2009).

El conjunto de minas a cielo abierto se ubica en una zona con baja complejidad estructural y una hipsometría correspondiente a planicies (Figura 3). Se localiza dentro del Valle de Toluca–Lerma, con una elevación media de 2620 m. s. n. m. El sitio donde se encuentran las minas tiene una elevación que oscila entre la cota 2603.00 m. s. n. m. y la 2668.00 m. s. n. m., con un desnivel topográfico de 65 m. Se localiza dentro de la provincia del Eje Volcánico Transversal, subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac. Destaca la elevación conocida como el Cerro el Perico (2720 m. s. n. m.), el cual se ubica al poniente de la zona en estudio.

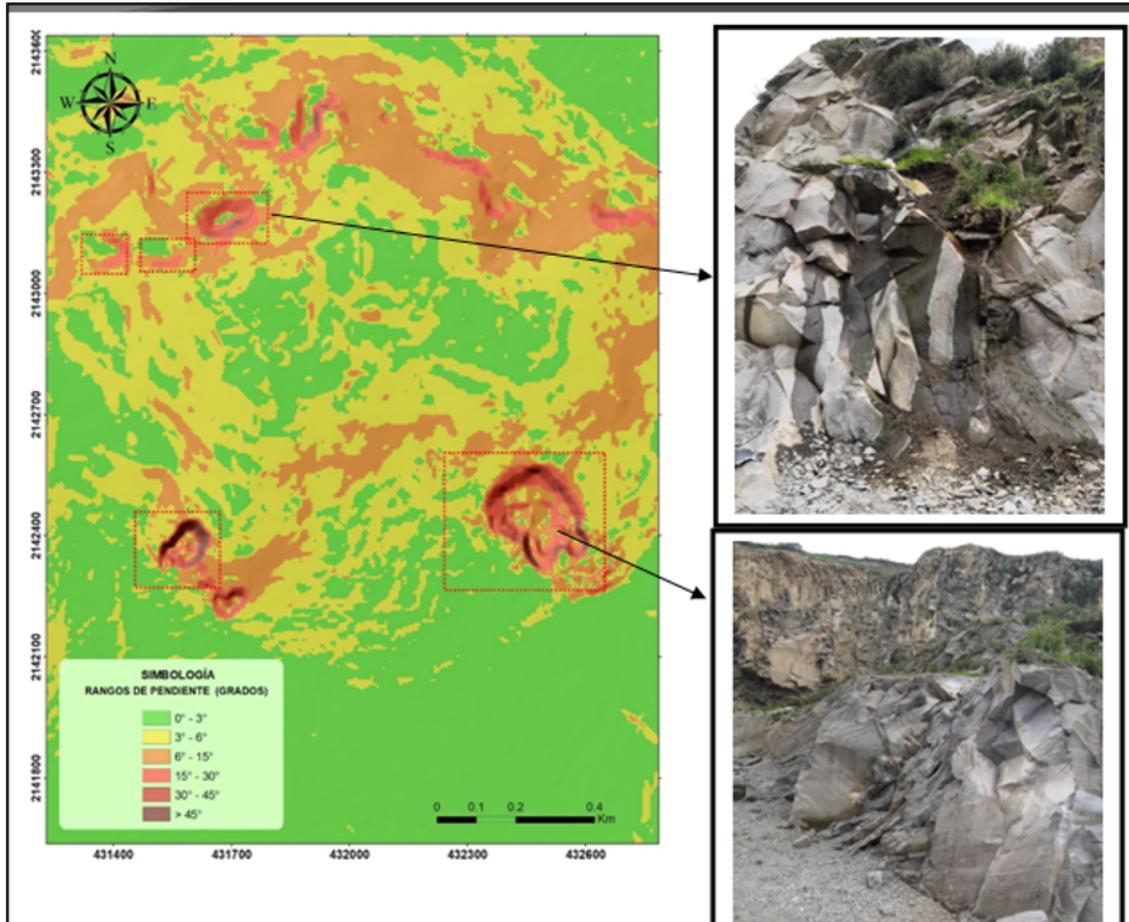


Figura 3. Hipsometría de la zona de estudio.
Fuente: Elaboración propia con base en datos de INEGI (2020b).

Tanto la geología como la constitución hipsométrica de la zona de estudio resultan determinantes para el desarrollo de la propuesta de rehabilitación ambiental (PRA), debido a las condiciones físicas y estructurales que limitan las aptitudes para ciertas actividades que se podrían integrar, además de tener el potencial de brindar valores escénicos y paisajísticos relacionados al esparcimiento en afloramientos pétreos de origen ígneo.

Como consecuencia de la actividad extractiva, el relieve local ha sufrido modificaciones drásticas (Figura 3), propiciando un escenario de riesgo por desprendimientos de rocas. En este sentido, se sugiere que el PRA considere en su diseño algunas de las medidas de estabilidad de taludes. Las medidas pueden diseñarse a partir de un sistema de defensa activa o pasiva (Chen *et al.*, 2022).

Indicador recurso hídrico

Las minas a cielo abierto en estudio se ubican dentro de la Región Hidrológica Lerma Chapala Santiago RH12, Cuenca Alta del Río Lerma, Subcuenca Río Tejalpa. La zona corresponde espacialmente al acuífero del Valle de Toluca, que, de acuerdo con la información de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) (Mejía & Ruiz, 2012), se encuentra en condiciones de sobreexplotación. Con base en la información oficial, se presenta la red de drenaje (Figura 4).

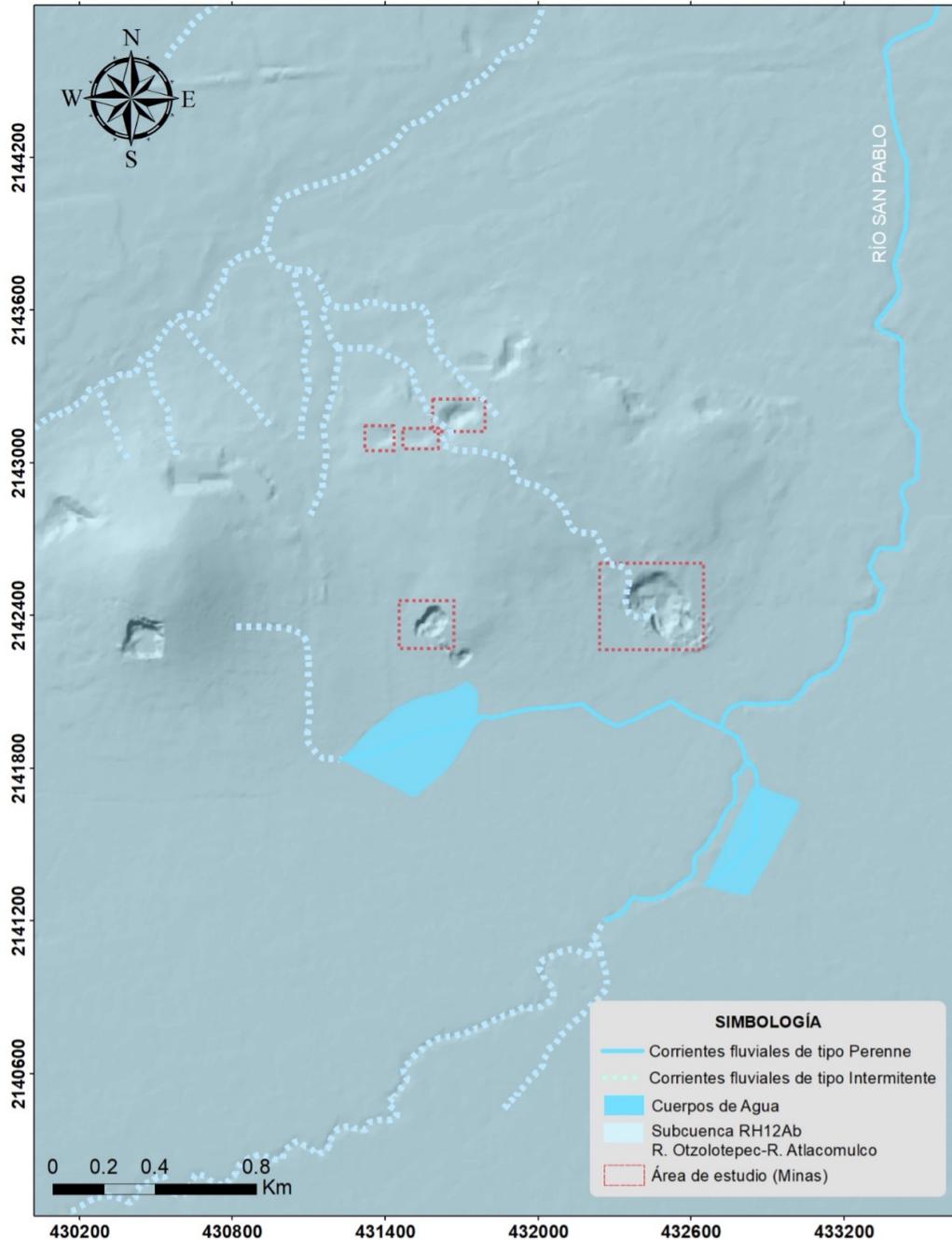


Figura 4. Hidrología superficial en la zona de estudio.
Fuente: Elaboración propia con base en datos de Conagua (2022) e INEGI (2020b).

Una propuesta que considere la convocatoria de población a un sitio en específico requiere disponer de agua para satisfacer necesidades de consumo e higiene. Por otro lado, la relación entre hipsometría-edafología y la hidrología debe ser analizada de forma holística, de forma tal que permita gestionar los escenarios de riesgo por inundaciones; es decir, en caso de presentarse este fenómeno, se debe contar con las medidas necesarias para afrontar sus posibles impactos negativos, considerando factores geográficos y sistemas preventivos, como los que establece la Comisión Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred, 2014) en su fascículo correspondiente a inundaciones. Para el caso de la zona de estudio, de acuerdo con la información obtenida en campo, se cuenta con las condiciones necesarias en cuanto a disponibilidad de agua.

Indicador ecológico

De acuerdo con la clasificación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020b) y tomando en cuenta las características de la zona, el grado de urbanización y el impacto histórico ambiental, el área donde se desarrolló el estudio está catalogado como agrícola de riego. La vegetación identificada en la zona se reduce a pequeños arbustos y pasto que crecen en los bordes de los caminos (Figura 5); no obstante, en el sitio específico (indicadas con rectángulos de color rojo) se desarrollan actividades de explotación de recursos pétreos, tal y como se señaló anteriormente.

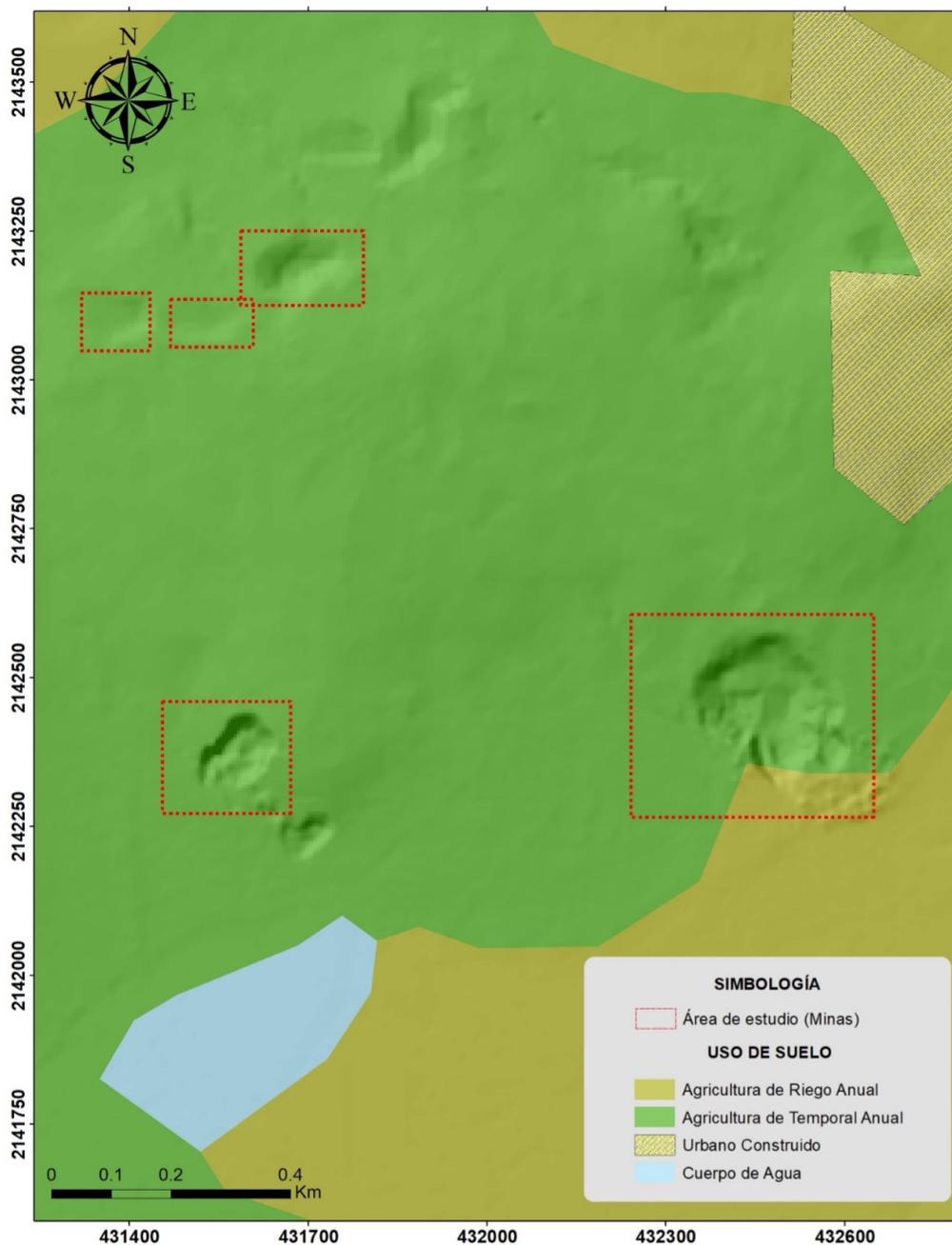


Figura 5. Uso de suelo de la zona de estudio.
Fuente: Elaboración propia con base en datos de INEGI (2020).

La composición edafológica de la zona es dominada por suelos de tipo vertisol, mismos que son ligeramente salinos, lo que puede condicionar el desarrollo de los cultivos sensibles a las sales. Se presentan dificultades en el manejo sustentable ya que su composición y estructura dificulta su labranza, con frecuencia se presentan inundaciones; mientras que, debido a su escasa porosidad, su drenaje interno es lento, la clase textural de estos suelos es fina y su fase física es dórica profunda. Dichos suelos son considerados altamente aptos para la actividad agrícola, por lo general son muy fértiles y tienen alto contenido de arcilla.

No obstante las condiciones de deterioro actuales de los suelos de la zona de estudio, se pueden aplicar medidas de recuperación de suelo como las propuestas por Montes de Oca-Risco & Ulloa-Carcassés (2013), a fin de brindar la posibilidad para albergar especies endémicas tanto de flora como de fauna, brindando un impacto en el componente paisajístico, elemento a tener en cuenta en la PRA.

Indicador socioeconómico

De acuerdo con Soto-Díaz & Estrada-Olivella (2022), a nivel metropolitano, San Pablo Autopan se distingue por sus orígenes étnicos. El INEGI estima que para 2020 tenía una población superior a los 47 mil habitantes, de los cuales 4.30% hablan alguna lengua indígena (INEGI, 2020a). Por ejemplo, en conjunto con otras delegaciones como San Cristóbal Huichochitlán, San Andrés Cuexcontitlán, San Diego de los Padres Cuexcontitlán y Jicaltepec de Autopan, integra el mayor conglomerado de asentamientos del pueblo originario Otomí.

El índice de marginación urbana es un indicador que permite identificar las carencias de la población con respecto a la localidad donde habita y la ciudad a la que pertenece; está compuesto de variables como Educación, Salud y Vivienda. De acuerdo con el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval, 2018), San Pablo Autopan es la localidad con mayor índice de marginación del municipio. Al desarrollar la PRA, se deben considerar los componentes socioculturales y económicos, factores determinantes para integrar a la comunidad endémica y vecina en un proyecto de conjunto, donde las actividades antrópicas indiscutiblemente impacten en los planes y propuestas de desarrollo local.

Discusión

Propuesta de rehabilitación ambiental (PRA) para las minas a cielo abierto de San Pablo de Autopan

Considerando el aporte de las descripciones de los cuatro indicadores descritos en el diagnóstico, se propone un uso recreativo. Para esto, se retoman ideas de casos de éxito de recuperación de espacios degradados por minería pétreo (Espinosa-Rodríguez, 2017; Gobierno de la Rioja, 2009; Marroquín-Castillo *et al.*, 2017; Milián-Milián *et al.*, 2012; Montes de Oca *et al.*, 2018).

Los trabajos citados coinciden en abordar sitios degradados por minería de pétreos y, a su vez, proponen medidas para recuperarlos, lo anterior mediante planes que incluyen acciones blandas y duras como el análisis de la aptitud de los mismos para realizar actividades de esparcimiento y la recuperación de especies endémicas. En el caso particular de la propuesta de Espinosa-Rodríguez (2017), se analizó el potencial del distrito minero Tlalpujahua-El Oro para aspirar a ser declarado geoparque, a través de un sistema de evaluación matricial mediante el cual se obtuvieron indicadores que incluían factores físicos del territorio, así como cuestiones de accesibilidad. Por otro lado, en el trabajo de Montes de Oca *et al.* (2018) se elaboró una propuesta de recuperación de áreas dañadas por minería de cantera en Santiago de Cuba, la propuesta consiste en evaluar la aptitud del terreno para albergar especies forestales.

Como proyecto piloto, se sugiere aplicar el procedimiento de rehabilitación ambiental en las minas 1, 2 y 3 (Figura 1), que son las que han generado la mayor degradación a los componentes ambientales del área. La propuesta en este caso consiste en un parque lineal con amenidades para el esparcimiento. Los parques lineales se instauran como espacios públicos naturales para la conexión de los ecosistemas, la conservación de la biodiversidad de los mismos y la descontaminación de las micro cuencas, para que la ciudadanía las disfrute con la recreación pasiva al aire libre y en contacto con la naturaleza (Herrán-Cuertas, 2012).

En la Figura 6 se muestra un ejemplo que corresponde al parque lineal de la carretera Metepec-Tenango, el cual ha servido como espacio de esparcimiento y albergue de especies endémicas.



Figura 6. Parque lineal carretera Metepec-Tenango.
Fuente: Elaboración propia.

A escasos kilómetros de las minas a cielo abierto que son objeto de estudio, se emplazan desarrollos urbanos habitados, por ejemplo, los fraccionamientos Casa Ara, Galaxia y San Diego Linares, los cuales requieren de zonas de amortiguamiento ambiental y esparcimiento. El sitio seleccionado como proyecto piloto tiene accesos y proximidad a zonas urbanas. Es una zona que cuenta con un patrimonio geológico-geomorfológico caracterizado por afloramientos de rocas ígneas volcánicas como andesitas y basaltos que brindan riquezas paisajísticas. Desde la óptica escénica, cuenta con potencial para realizar senderismo, actividades deportivas y de esparcimiento. El potencial es avalado por zonas de valle compuestos por depósitos cuaternarios de sedimentos, producto de la erosión de las rocas ígneas, lo que favorece la infiltración.

Es indudable el impacto negativo que genera la actividad antrópica sobre el territorio; sin embargo, como quedó plasmado previamente en este trabajo, la actividad minera es especialmente dañina para los ecosistemas terrestres. El impacto al paisaje por la minería a cielo abierto ha sido documentado en varias investigaciones, como la de Aguilera-Fernández *et al.* (2016), por citar alguna. La zona de abordaje del presente trabajo muestra los estragos por este tipo de minería; si bien es a una escala local, la devastación del territorio es evidente (Figura 7).



Figura 7. Estado de degradación paisajística actual de la zona de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

Desde la perspectiva de la sostenibilidad, el proponer medidas de recuperación de espacios degradados brindaría la posibilidad de coadyuvar a cumplir los objetivos de desarrollo sostenible propuestos en la agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2015), específicamente los objetivos: 6. Agua limpia y saneamiento, 11. Ciudades y comunidades sostenibles, 13. Acción por el clima y 15. Vida de ecosistemas terrestres. Se atenderían considerando la propuesta que se sustenta a continuación.

De acuerdo con el diagnóstico realizado, se sugiere, para el conjunto de minas 1, 2 y 3, aplicar un grupo de medidas que conducirían a la creación de un entorno seguro y ambientalmente protegido. Las medidas sugeridas son:

- 1) Se propone restaurar los suelos degradados a través de reforestación y manejo de paisaje atendiendo a las sugerencias del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) con acciones como: mejoramiento de pastos, reciclaje de recursos orgánicos y disposición en los sitios a fin de reconstruir la masa edáfica y agroforestería (IICA, 2016).

- 2) Se propone plantar flores endémicas del sitio objeto de estudio con organismos como cempasúchil, rosas o campanilla y árboles como el capulín, el tejocote, el pino y el cedro. En el perímetro de las canteras en estudio se muestra viabilidad para la siembra de cactus y nopales.
- 3) De acuerdo con INEGI (2023), la precipitación media anual en la zona de estudio es de 900 mm, esto significa que hay potencial para establecer mecanismos de captación de agua de lluvia como los propuestos por Roblero-Hidalgo & Flores-Velázquez (2022) en el orden de incrementar la sostenibilidad y la autosuficiencia del proyecto.
- 4) Se propone instalar paneles de aprovechamiento de energía solar como fuente de abastecimiento del alumbrado del sitio. Este método no solo generaría un decrecimiento en los impactos negativos al ambiente, sino que además coadyuvaría a aumentar la sustentabilidad del proyecto.
- 5) En lo que respecta al manejo de los residuos sólidos urbanos (RSU) que se generarían por el uso del parque, se propone aplicar técnicas de reciclaje como las propuestas por Reyes-Curcio *et al.* (2015).
- 6) Se propone reducir las pendientes de los taludes del perímetro del proyecto hasta los 20° (Valencia-García, 2022). El material retirado puede emplearse en la ejecución de la obra. En caso de que no sea posible la reducción del talud, entonces se sugiere aplicar medidas de protección por caídas de rocas, seleccionando un sistema de defensa activa o pasiva, que sea coherente con el proyecto arquitectónico del parque (Canales-Lauro & Aguiluz-León, 2021; Greco & Martínez 2015).

Conclusiones

La minería de recursos pétreos, y en específico la de cielo abierto, es importante desde el punto de vista económico de un país y es fundamental en la industria de la construcción y otras industrias relacionadas a infraestructura urbana; sin embargo, cuando se abandona un tajo minero, se genera la mayoría de las veces un pasivo ambiental.

Dentro de los impactos negativos que genera la extracción de pétreos está el impacto sobre procesos geomorfológicos, que ocurre por aumento de las pendientes en el perímetro de las minas. Es necesario considerar este elemento para su uso posterior, de acuerdo con el proyecto de rehabilitación definido, especialmente por el nivel de peligro que representa para las personas y la infraestructura.

Los pasivos ambientales, en general, y en particular las minas a cielo abierto que son objeto de estudio de esta investigación, son espacios geográficos que fueron sometidos a alteraciones del drenaje. La modificación de la geomorfología local provoca a su vez modificaciones en el cauce de aguas pluviales y el aumento de la erosión.

El objetivo de este estudio fue establecer un procedimiento de rehabilitación ambiental de las minas a cielo abierto de San Pablo, considerando indicadores geólogo-ambientales y la integración de la normatividad ambiental vigente en el Estado de México, a fin de proponer medidas de recuperación y rehabilitaciones pertinentes. Para cumplir dicho objetivo, se conjugaron indicadores físicos, sociales y normativos, y de esta forma se alcanza la propuesta más adecuada, mediante la investigación documental, la elaboración de fichas bibliográficas, el análisis de la información y la colecta de datos cartográficos antecedentes de la zona.

Se elabora el diagnóstico de la zona de minas a cielo abierto que han dejado de ser explotadas en Jicaltepec Autopan (pasivos ambientales), y posteriormente se genera la propuesta de restauración para el caso de las minas 1, 2 y 3 previamente señaladas en la Figura 1.

La ejecución de la propuesta, expresada como un caso piloto, puede ser replicada a las otras cuatro minas abandonadas de Jicaltepec Autopan. Esto permitiría, entre otros beneficios, (1) reducir la disposición inadecuada de residuos sólidos urbanos y su posterior impacto negativo en el ambiente, (2) reducir sitios conocidos como focos rojos de inseguridad pública y (3) generar un lugar de esparcimiento para la población de las comunidades aledañas.

Agradecimientos

Se agradece a la Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México por brindar las herramientas necesarias para el desarrollo de esta investigación, así como a los asesores de este trabajo. Se agradece de antemano a la revista Acta Universitaria por ser un medio de difusión de la ciencia.

Conflicto de interés

Los autores de esta investigación declaran bajo protesta de decir la verdad que este es un trabajo original y que no existen conflictos de interés.

Referencias

- Aguilera, J., Borderías, P., González, P., & Santos, J. M. (2020). *Geografía General II. Geografía Humana*. UNED. https://books.google.com.mx/books?id=_1H4DwAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summar_y_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Aguilera-Fernández, I., Batista-Legrá, Y. E., Bastola, S., & Rojas-Purón, L. (2016). Impacto visual generado por la explotación minera en el yacimiento Punta Gorda, Moa. *Minería y Geología*, 32(4), 141-159. https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art10_No4_2016
- Azamar-Alonso, A. (2015). La Mina de San Xavier: actividad extractiva y daño al tejido social en México. *Paradigma Económico. Revista de Economía Regional y Sectorial*, 7(2), 47-67. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=431565601003>
- Bastidas-Orrego, L. M., Ramírez-Valverde, B., Cesín-Vargas, A., Juárez-Sánchez, J. P., Martínez-Carrera, D., & Vaquera-Huerta, H. (2018). Socioenvironmental conflicts and open-pit mining in the sierra norte de puebla, Mexico. *Textual*, (72), 35-66. <https://doi.org/10.5154/r.textual.2017.72.003>
- Bernache-Pérez, G. (2012). El confinamiento de la basura urbana y la contaminación de las fuentes de agua en México. *Revista de El Colegio de San Luis*, 2(4), 36-53. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=426239577003>

- Cámara de Diputados de la H. LIII Legislatura del Estado (1997). *Ley de Desarrollo sustentable y Protección al Ambiente del Estado de México*.
<https://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/ley/abr/leyabr033.pdf>
- Cámara de Diputados del H. Congreso de La Unión (2012). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. https://www.senado.gob.mx/comisiones/desarrollo_social/docs/marco/Ley_GEEPA.pdf
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión (2015). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. <https://www.gob.mx/profepa/documentos/ley-general-para-la-prevencion-y-gestion-integral-de-los-residuos-62914#:~:text=Tiene%20por%20objeto%20garantizar%20el,la%20contaminaci%C3%B3n%20de%20sitios%20con>
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión (2023). *Ley de Minería*.
<https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LMin.pdf>
- Canales-Lauro, N. A., & Aguiluz-León, J. (2021). Posmodernidad, heterotopía y complejidad urbana: análisis de la zona de bancos de material “Las Minas” en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. *Revista Legado de Arquitectura y Diseño*, 16(30), 80–89. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=477970592008>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred). (2014). *Fascículo inundaciones*. Secretaría de Gobernación (Segob). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/112861/3-FASCCULOINUNDACIONES-ilovepdf-compressed.pdf>
- Chen, H., Wang, F., Xu, G., & Guo, L. (2022). Laboratory model test of eco-concrete slab slope protection. In G. Feng (ed.), *Proceedings of the 8th International Conference on Civil Engineering* (pp. 358–367). Springer.
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2022). *SIATL-Simulador de Flujos de Agua de Cuencas*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/investigacion/estadisticas/>
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval). (2018). *Evaluación Estratégica de Protección Social en México*. <https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Paginas/eval-Estrategica-Proteccion-Social.aspx>
- Delgado, G. C. (2023). Mexico: mineral policy. In G. Tiess, T. Majumder, & P. Cameron (eds.), *Encyclopedia of mineral and energy policy* (pp. 445–452). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-47493-8_167
- Diario oficial de la Federación (DOF). (2011). NORMA Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011, *Contaminación atmosférica-Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición*. Secretaría de medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4632/semarnat/semarnat.htm>
- Dirección Nacional de Vialidad (2014). *Guía metodológica para la planificación de la restauración ambiental de canteras viales en desuso*. Argentina.
- Eckstrand, O. R. (1977). Mineral resource appraisal and mineral deposits computer files in the Geological Survey of Canada. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 9(3), 235–243. <https://doi.org/10.1007/BF02272385>
- Espinosa-Rodríguez, L. M. (2017). Geoparque en el Distrito Minero Tlalpujahua—El Oro. *CienciaUAT*, 11(2), 24–45. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=441949672002>
- Expósito, J. L. (2012). *Características hidrodinámicas e hidroquímicas del acuífero multicapa del Valle de Toluca y sus implicaciones en la optimización de estrategias para la protección de la calidad del agua subterránea* [Tesis de doctoral]. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Fernández-Muerza, A. (2007). Impacto ambiental en la minería a cielo abierto. *Revista Ambientum*.
- Galindo, J. (2015). El concepto de riesgo en las teorías de Ulrich Beck y Niklas Luhmann. *Acta Sociológica*, 67, 141–164. <https://doi.org/10.1016/j.acso.2015.03.005>
- Gobierno de la Rioja. (2009). *Manual de restauración de minas a cielo abierto*.
<https://es.scribd.com/document/333609119/Restauracion-de-Minas-a-Cielo-Abierto>
- Gobierno del Estado de México. (2010). *Norma Técnica Estatal Ambiental NTEA-002-SMA-DS-2009*.
<https://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/gct/2010/nov121.PDF>

- Gobierno Municipal de Toluca 2022-2024. (2022). *Plan de Desarrollo Municipal de Toluca 2022-2024*. Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado de México.
https://copladem.edomex.gob.mx/sites/copladem.edomex.gob.mx/files/files/pdf/Planes%20y%20programas/Mpales-2022-2024/Toluca_PDM_%202022_2024.pdf
- González, V., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Hall.
- Hernández-Acosta, E., Mondragón-Romero, E., Cristóbal-Acevedo, D., Rubiños-Panta, J. E., & Robledo-Santoyo, E. (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.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62912351004>
- Greco, D., & Martínez, R. (31 de julio de 2015). *Sistemas de protección de taludes*. RevistaVial.com.
<https://revistavial.com/sistemas-de-proteccion-de-taludes/>
- Hernández-Jatib, N., Ulloa-Carcasés, M., & Rosario-Ferrer, Y. (2011). Impacto ambiental de la explotación del yacimiento de materiales de construcción. El Cacao. *Minería y Geología*, 27(1), 38–52.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223522419003>
- Herrán-Cuartas, C. (2012). Los parques lineales como nueva modalidad de espacio público inclusivo en la ciudad de Medellín. *Sistemas & Telemática*, 10(22), 159–166.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=411534390016>
- IFOMEGEM. (2019). *Directorio de minas (materiales metálicos y no metálicos)*.
http://ifomegem.edomex.gob.mx/sites/ifomegem.edomex.gob.mx/files/files/Inf%20Geologico%20Minera/Carta_Geol%C3%B3gica_Edo_Mex.pdf
- IGECEM. (2023). *Visor Atlas Cibernético del Estado de México*.
<http://acvisor.edomex.gob.mx/AtlasCibernetico/portal/visorAtlas.do>
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2016). *Iniciativas globales para la restauración de suelos degradados*. https://d.documentop.com/queue/iniciativas-globales-para-la-restauracion-de-suelos-infoagronet_5a1643471723dd95afcb5bc.html
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020a). *Censo de Población y Vivienda 2020*.
https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Datos_abiertos
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020b). *Marco Geoestadístico Nacional 2020*.
<https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#Descargas>
- Instituto Nacional de Estadística y geografía (INEGI). (2023). *Sistema Integral de Información del Agua*.
https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siat/
- Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México. (2009). *Atlas Geológico - Ambiental del Estado de México*. https://ifomegem.edomex.gob.mx/carta_geologica
- Marroquín-Castillo, J. J., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., Mata-Balderas, J. M., Rubio-Camacho, E. A., & Collantes, A. (2017). Efecto de la restauración post-minería de la comunidad vegetal de matorral xerófilo, en Nuevo León, México. *Acta Botanica Mexicana*, 120, 7–20.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57452067001>
- Mejía, L. E., & Ruiz, J. A. (2012). Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica para la toma de decisiones. Caso CONAGUA Estado de México. *RECAI Revista de Estudios en Contaduría, Administración e Infomática*, 1(1), 30–47. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=637967194001>
- Milián-Milián, E., Ulloa-Carcasés, M., Jornada-Krebs, A. S., & Rosario-Ferrer, Y. (2012). Procedimiento para la rehabilitación minero-ambiental de yacimientos piríticos polimetálicos cubanos. *Minería y Geología*, 28(4), 20–40. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223524909002>
- Montes de Oca-Risco, A., & Ulloa-Carcasés, M. (2013). Recuperación de áreas dañadas por la minería en la cantera los Guaos, Santiago de Cuba, Cuba. *Revista Luna Azul*, (37), 74-88.
- Montes de Oca-Pérez, A., & Rosario-Ferrer, Y. (2014). Ontología de evaluación de impacto ambiental para proyectos mineros. *Minería y Geología*, 30(1), 104–117.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223531234008>
- Montes de Oca, A., Ulloa, M., & Silot, Á. L. (2018). Recuperación de áreas degradadas en canteras de áridos utilizando sistemas de información geográficos. *Revista Geográfica Venezolana*, 59(2), 314–331.
<https://www.redalyc.org/journal/3477/347760473006/347760473006.pdf>

- Moon, C. J., Whateley, M. K. G., & Evans, A. M. (1995). *Introduction to mineral exploration*.
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:128840040>
- Noetstaller, R. (1998). *Industrial minerals: a technical review* (Vol. 1). World Bank.
<https://catalogue.nla.gov.au/catalog/1777530>
- Olivera, B., Peláez, J., García-Zamora, R., & Pérez, S. (2019). Los escasos aportes de la minería al desarrollo del país. En Universidad Autónoma de México (ed.), *¿Por qué es necesario cambiar la ley minera?* (pp. 1–19). Fundar.
- Ordoñez-Ruiz, E. A., & Espinoza-Aguilar, Y. P. (2019). *Rehabilitación de zonas afectadas por los pasivos mineros en el sector Cerro Pelado en el frente Ecuaba* [Trabajo de titulación]. Universidad Técnica de Machala.
<http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/15025>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). *Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Un.org.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
- Orozco-Martínez, Y., & Rodríguez-Gámez, L. I. (2022). Narrativas del riesgo minero: cartografía y discursos en el río Sonora, México. *Intersticios Sociales*, 24, 297–332. <https://doi.org/10.55555/IS.24.454>
- Ousmanou, S., Fozing, E. M., Kwékam, M., Fodoue, Y., & Jeatsa, L. D. A. (2023). Application of remote sensing techniques in lithological and mineral exploration: discrimination of granitoids bearing iron and corundum deposits in southeastern Banyo, Adamawa region-Cameroon. *Earth Science Informatics*, 16(1), 259–285. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-00937-5>
- Ozcelik, M. (2022). Comparison of the environmental impact and production cost rates of aggregates produced from stream deposits and crushed rock quarries (Boğaçay Basin/Antalya/Turkey). *Geoheritage*, 14(1), 18. <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00659-y>
- Reina-Jiménez, L. E. (2013). *Diagnóstico Ambiental de la actividad minera de materiales pétreos en las canteras del sector de CALDERÓN, provincia de PICHINCHA* [Tesis]. Escuela Politécnica Nacional.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6169>
- Reyes-Curcio, A., Pellegrini-Blanco, N., & Reyes-Gil, R. E. (2015). El reciclaje como alternativa de manejo de los residuos sólidos en el sector minas de Baruta, Estado Miranda, Venezuela. *Revista de Investigación*, 39(86), 157–170. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-29142015000300008
- Rivera-Pabón, J. A., & Senna, D. C. (2017). Análisis de unidades de paisaje y evaluación de impacto ambiental como herramientas para la gestión ambiental municipal. Caso de aplicación: Municipio de Tona, España. *Revista Luna Azul*, (45), 171–200. <https://doi.org/10.17151/luaz.2017.45.10>
- Roblero-Hidalgo, R., & Flores-Velázquez, J. (2022). Captación de agua de lluvia como alternativa para uso en agricultura urbana. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (11), 111–124.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=665170661006>
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2023). *Anuario estadístico de la minería mexicana*.
<https://www.gob.mx/sgm/articulos/consulta-el-anuario-estadistico-de-la-mineria-mexicana>
- Silvia-Ontiveros, L. (coord.) (2021). *Y después de la mina ¿qué? hacia una política de cierre de minas*. Fundación Heinrich Böll. https://engenera.org/wp-content/uploads/2022/06/Informe_cierre_minas.pdf
- Soto-Díaz, E., & Estrada-Olivella, R. (2022). El habitar e identidad étnica en la periferia urbana (Zona Metropolitana de Toluca, México). *PatryTer*, 5(9), 125–141. <https://doi.org/10.26512/patryter.v5i9.35179>
- Torres-Batista, Y., Rodríguez-Córdova, R. G., & Reynaldo-Argüelles, C. L. (2019a). Propuesta de un procedimiento para la rehabilitación minera en explotaciones a cielo abierto. *Minería y Geología*, 35(1), 17–30.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223557636016>
- Torres-Batista, Y., Rodríguez-Córdova, R., & Reynaldo-Argüelles, C. L. (2019b). Aproximación teórica a un modelo de gestión económico-ambiental para la rehabilitación minera. *Revista Luna Azul*, (48), 109–120.
<https://doi.org/10.17151/luaz.2019.48.6>
- Valencia-García, E. A. (2022). *Parques urbanos sustentables como mecanismos de resiliencia ante espacios degradados por actividad minera, municipio de Calimaya Estado de México* [Tesis Doctoral]. Universidad Autónoma del Estado de México. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/138683>
- Younger, P. L., Wolkersdorfer, C., & ERMITE-Consortium. (2004). Mining impacts on the fresh water environment: technical and managerial guidelines for catchment scale management. *Mine Water and the Environment*, 23, 2–80. <https://doi.org/10.1007/s10230-004-0028-0>