

Dinámica productiva de la industria del mármol en la región mixteca en México

Productive dynamics of the marble industry in the mixteca region in Mexico

Teodoro Alarcón Ruiz^{1,2}  / Luis Enrique García Santamaría¹  / Eduardo Fernández Echeverría^{1,3/}
Ma. Loecelia G. Ruvalcaba Sánchez⁴ / Gregorio Fernández Lambert¹  

¹Tecnológico Nacional de México/ITS de Misantla, Laboratorio de Logística y Sustentabilidad en Economías Emergentes. Misantla, Veracruz, México

²Tecnológico Nacional de México/ITS de Puebla, Estudios de Posgrado e Investigación. Puebla, Puebla, México

³Tecnológico Nacional de México/ITS de Zacapoaxtla, Departamento de Ingeniería Industrial. Zacapoaxtla, Puebla, México.

⁴Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial. Aguascalientes, Aguascalientes, México

✉ Correspondencia: gfernandezl@itsm.edu.mx

Recepción: 18-08-2023 / Aceptación: 16-01-2024 / Publicación: 29-05-2024

© Nova Scientia / ISSN 2007-0705 / CC BY-NC-SA 4.0 Internacional / <https://doi.org/10.21640/ns.v16i32.3461>

Resumen: el sector marmolero observa una diversidad de artículos que reportan de manera abundante los problemas de bajas eficiencias, desactualización tecnológica, higiene y de salud laboral, así como las externalidades negativas con impacto a la sociedad y a los ecosistemas. Sin embargo, son nulos los estudios desde su cadena de suministro que reporten la dinámica productiva de este sector. Este artículo apoyado de una Revisión de Alcance del periodo 2006-2024 describe la dinámica productiva y propone dar respuesta a las implicaciones prácticas que impactan en la baja productividad y las externalidades negativas socioambientales de la industria del mármol de La Laguna y la región mixteca poblana en México desde sus actores en la cadena de suministro. Los hallazgos cubren un vacío de información de la relación que guardan los actores económicos en la cadena de suministro de esta industria en México, y resaltan que las implicaciones prácticas para llevar a esta industria hacia una empresa sustentable requieren de la disposición de herramientas tecnológicas para la extracción y el trabajo del mineral desde su cantera, la cual es fortalecida por la habilidad y destreza del trabajador durante el desempeño de sus actividades.

Palabras clave: industria minera; cantera; roca mineral; construcción; sostenibilidad, minería, ónix, piedra

Abstract: the marble sector observes a diversity of articles that abundantly report the problems of low efficiencies, technological outdatedness, hygiene and occupational health, as well as negative externalities with an impact on society and ecosystems. However, there are no studies from its supply chain that report the productive dynamics of this sector. This article supported by a Scope Review for the period 2006-2024 describes the productive dynamics and proposes to respond to the practical implications that impact low productivity and negative socio-environmental externalities of the marble industry of La Laguna and the mixteca poblana region in Mexico from its actors in the supply chain. The findings fill an information gap regarding the relationship between the economic actors in the supply chain of this industry in Mexico, and highlight that the practical implications of leading this industry towards a sustainable company require the provision of technological tools for the extraction and work of the mineral from its quarry, which is strengthened by the ability and skill of the worker during the performance of their activities.

Keywords: mining industry; quarry; mineral rock; construction; sustainability; mining, onyx; stone

1. Introducción

El mármol es una roca metamórfica apreciada en el mundo por su belleza. Los países con las canteras más grandes son: Italia, España, Portugal, Turquía y Grecia, dentro de los cuales, Italia, España y Grecia, participan con 32%, 25% y 15% de la producción mundial, respectivamente. A partir de la década de los sesenta, la industrialización del mármol en México ha experimentado un crecimiento constante. En el año 2020, tuvo una producción de 468 501.58 toneladas (Secretaría de Minería, 2021). La demanda de mármol ha crecido de manera exponencial en los últimos 10 años, impulsada con la búsqueda de mejorar las prácticas operacionales en la cadena de suministro (Aguilar, 2020).

Además, se ha observado la necesidad de incorporar prácticas que mejoren los procesos de extracción y manufactura, junto con la implementación de programas dedicados a la higiene, la seguridad industrial y ambiental (Secretaría de Economía, 2021). En México, destacan dos regiones dedicadas a la explotación y transformación de mármol, ubicadas geográficamente en la Sierra Madre Oriental al norte del país y en el Eje Neovolcánico al centro-oriente, con reservas estimadas para explotarse en los próximos 200 años (López et al., 2019). La primera, la región de la Laguna, posee la mayor cantidad de yacimientos de mármol. La segunda, la región mixteca, representada por la Sierra Mixteca, incluye dos zonas: la Región 1, ubicada en el estado de Puebla, y la Región 2, ubicada en Oaxaca. La Región 1 ofrece 13 variedades de mármol, mientras que la Región 2 ofrece siete. Sin embargo, las externalidades negativas son comunes. Quien desee explorar la diversidad del mármol en estas regiones puede referirse a fuentes como la Secretaría de Economía (2020, 2021), Santos et al. (2012), Ponce Palafox et al. (2020), Gobierno de Puebla (2019) y Aguilar (2020). En este contexto, Sandoval et al. (2017) señalan que esta industria en México enfrenta varios problemas durante las etapas de extracción y transformación. Entre estos, se destacan la baja productividad, el escaso aprovechamiento del mineral, los niveles reducidos de seguridad industrial, los impactos sociales adversos y las externalidades ambientales negativas a la naturaleza. Estos desafíos, según la Secretaría de Economía (2021), se atribuyen en parte al uso de tecnologías obsoletas, además de métodos de trabajo deficientes desde la extracción del mármol, lo que ocasiona considerables cantidades de residuos en los procesos de corte, pulido y acabado. Estos residuos son depositados en vertederos a cielo abierto, por lo que alteran el paisaje natural y ocasionan daños ambientales en el suelo y los mantos freáticos (García et al., 2017).

A pesar del alto valor comercial del mármol, el proceso de extracción en canteras no solo tiene un impacto negativo en los ecosistemas donde se lleva a cabo esta actividad (García et al.; Salem, 2021), sino que también ha sido objeto de cuestionamientos como una fuente de enfermedades respiratorias y accidentes traumáticos (Santos et al., 2012; Ayber et al., 2017; Mulk, 2017). Las repercusiones negativas de la industria del mármol, tales como la descarga de efluentes en suelo y cuerpos de agua, la generación de residuos de piedra y polvo, junto con un uso excesivo de agua en sus procesos (Oller, 2021; 2022), intensifican los desafíos ambientales y de salud asociados con esta actividad. En este contexto, la literatura deja ver que el 37.5% de los estudios señalan los residuos de mármol como el principal factor de impacto ambiental negativo en canteras y procesos de manufactura; el 25% de los estudios resaltan la ineficiencia de la cadena de suministro; el 18.7% de los estudios informan problemas por el alto consumo de agua, y el restante 8.8% expresa la preocupación por daños a la salud.

Para abordar estas externalidades negativas a nivel internacional se han propuesto políticas públicas para controlar la explotación inadecuada del mármol: estrategias de reducción del consumo de agua; alternativas para el reúso de los desperdicios generados en distintos procesos; estrategias para mejorar las prácticas en la transformación del mármol, y se han implementado programas de seguridad laboral para los trabajadores. No obstante, existe un vacío de estudios en la literatura científica que describa la dinámica productiva de este sector y permita comprender la relación entre los actores económicos y los miembros de esta industria. Con el propósito de entender la dinámica productiva, social y ambiental de la industria del mármol en la región mixteca de México, se lleva a cabo un análisis y una síntesis de la literatura nacional e internacional, que abarca un periodo del 2006 al 2024. La revisión se centra en estudios que proponen mejoras en las operaciones de la industria del mármol, desde la extracción de la roca en la cantera hasta la presentación del bloque final al cliente, con el fin de comprender la relación entre los diversos agentes que participan en la cadena de este sector. Específicamente, se refuerza el análisis de la literatura reportada de la región mixteca mediante la observación directa y el registro de fotos de la industria local. De esta forma, este artículo contribuye para identificar la relación entre los diferentes actores económicos y sus miembros de la cadena de suministro de la industria del mármol de la Región 2 en México. Las preguntas de investigación que guiaron este estudio fueron: ¿qué implicaciones presenta la industria del mármol para lograr su integración productiva y logística?, ¿qué impacto tienen las externalidades negativas en la dinámica productiva de la industria del mármol en México?, ¿cuáles son las implicaciones prácticas de la salud laboral-social en el desempeño productivo de la industria del mármol en la región mixteca? Para responder a estas preguntas, las secciones siguientes describen el enfoque de estudio utilizado en esta investigación y los estudios aproximados a su propósito. Posteriormente, se discuten los hallazgos nacionales e internacionales para resaltar las similitudes de la dinámica productiva de la industria del mármol nacional y de la mixteca poblana. Finalmente, se aclaran los hallazgos y se hace referencia a la dirección en que pueden enfocarse investigaciones futuras para esta industria.

2. Materiales y métodos

Este artículo está respaldado en una revisión de literatura que comprende del año 2006 al 2024, relacionado con la industria del mármol. Se recogió información de fuentes secundarias, y apoyado de una revisión de alcance, se sintetizaron los hallazgos nacionales e internacionales para comprender, especialmente la dinámica productiva de la industria del mármol de la región mixteca en México. Primero se identificaron los agentes sociales, políticos, económicos y productivos en el orden internacional y nacional, así como las problemáticas atendidas en esta industria, y posteriormente, se describieron estos agentes en su cadena de suministro. Los artículos se buscaron en inglés en las bases de datos Springer, Scopus de ScienceDirect, así como en español en Google Scholar, y en sitios de la web afines a la industria del mármol; también en documentos emitidos por la Secretaría de Economía del Estado de Puebla; la Secretaría de Minería de México; el Servicio Geológico Mexicano; la Comisión Nacional del Agua de México y la Secretaría de Economía de México. Una de las dificultades del proceso de búsqueda fue la alta repetición del término “mármol” para otros fines de estudio, la cual se resolvió con las palabras encadenadas: “marble industry” (A); “marble production” (B); “marble waste” (C); “marble effluents” (D); y posteriormente, se utilizó el encadenamiento de dos palabras: A-C; A-D; A-B. La búsqueda se realizó en el título, resumen y extenso. La Figura 1 describe el proceso de búsqueda, depuración y número de documentos elegidos de acuerdo con los siguientes criterios de inclusión:

- Artículos originales, de difusión/divulgación científica.
- Los artículos y documentos se encuentran disponibles en los enlaces web para la comunidad académica en general.
- Los artículos presentan un aporte al contexto productivo, ambiental, de seguridad y salud de la industria del mármol.
- Haberse publicado entre los años 2006 y 2024.

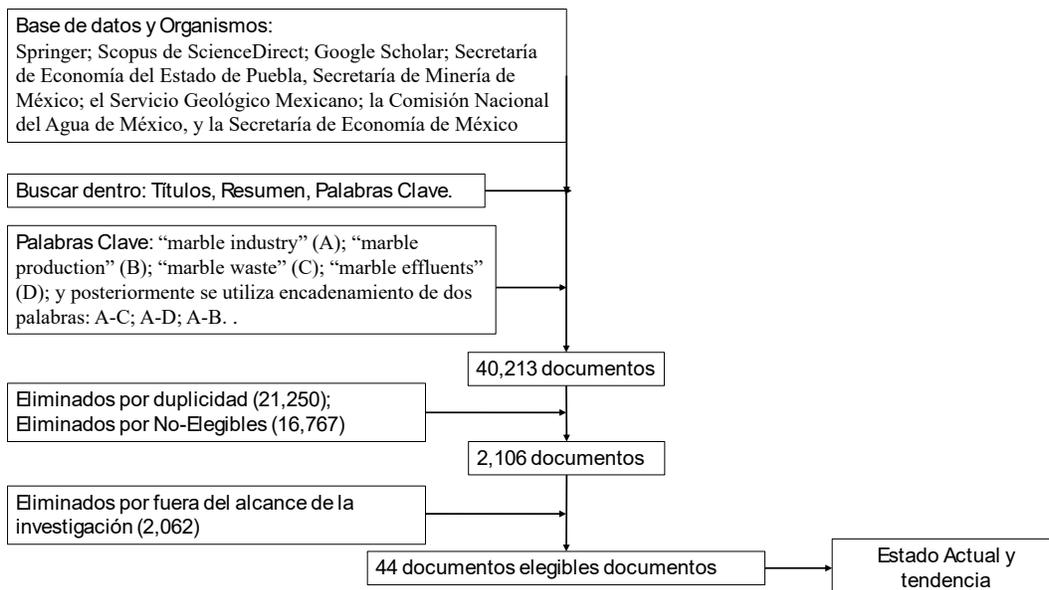


Figura 1. Identificación, cribado e inclusión de la literatura reportada en esta investigación.

Fuente: Elaboración propia.

Figure 1. Identification, screening and inclusion of the literature reported in this research.

Source: Own elaboration.

Los documentos relacionados y los registros se concentran en el gestor de documentos Mendeley®. Todos los datos subyacentes a los resultados están disponibles como parte de este artículo y no se necesitan datos de origen adicionales. Por último, no se requieren subvenciones en esta revisión de alcance.

2.1. Estudios aproximados y marco regulatorio nacional e internacional de la industria del mármol

La generalidad de los artículos en este periodo de análisis se centra en ámbitos sociales, económicos y ambientales. La red de coocurrencia de palabras claves de los autores descritas en la Figura 2 muestra los

temas que más han llamado la atención de los investigadores: mármol, residuos de mármol, polvo de mármol; así como el estudio de las propiedades mecánicas de los subproductos de esta industria, en los cuales predomina una relativa baja relación y superposición entre las producciones analizadas. Como puede observarse, la mayor densidad entre las palabras de mayor influencia prevé que los estudios se han centrado más en evaluar alternativas de reúso y aprovechamiento de los residuos de la industria del mármol.

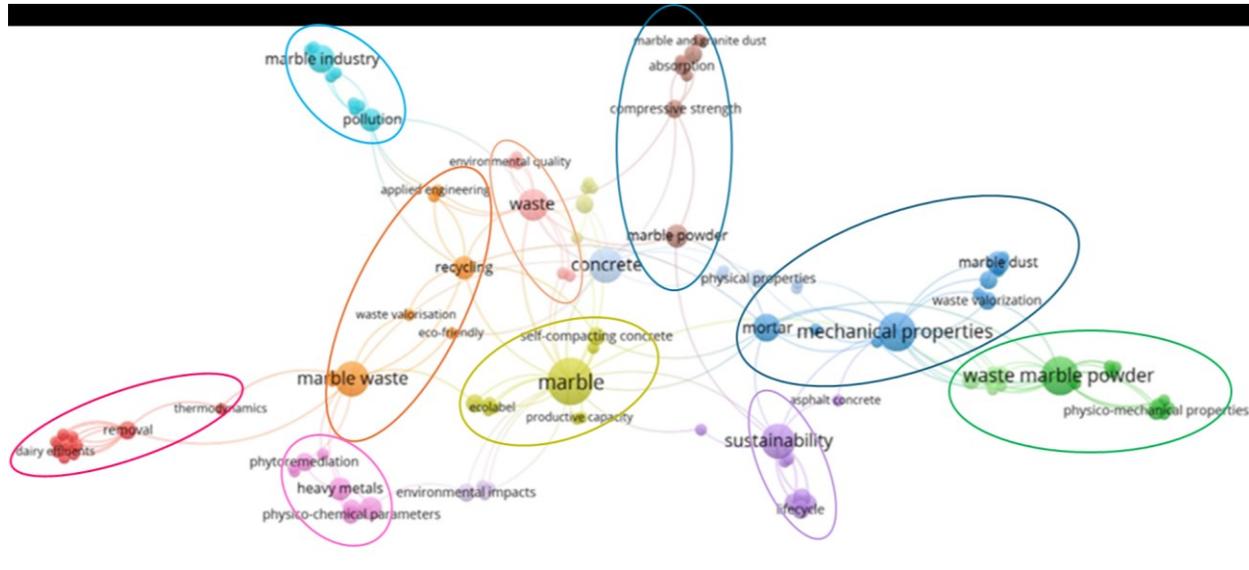


Figura 2. Densidad de ocurrencias de palabras clave en el periodo de estudio 2006-2024.

Fuente: Elaboración propia a partir de la revisión de literatura.

Figure 2. Density of keyword occurrences in the study period 2006-2024.

Source: Own elaboration based on literature review.

Estos estudios buscan plantear estrategias y métodos para aprovechar los residuos de este sector en la industria de la construcción (Kuoribo y Mahmoud, 2022). También, se han realizado análisis en los campos de investigación relacionados con la huella ambiental, energética e hídrica (Ahmad et al., 2022), y la evaluación de las propiedades físicas y químicas del mármol (Lendvai et al., 2024). Otros estudios han resaltado la inseguridad y la salud laboral. Encontramos que el 57% de los estudios reportados en la literatura en este periodo 2006-2024, se centraron en hacer propuestas para aprovechar los residuos de la industria del mármol; el 33% en cómo efficientar la cadena de valor; y el resto en resaltar y evaluar la externalidad negativa de esta industria, especialmente en el impacto en la salud humana, el sistema acuático y el sistema vegetativo. En el orden social, Corinaldesi et al. (2010) estudiaron el polvo de mármol para reutilizarlo en mezclas de hormigón para darle valor postindustrial y disminuir su impacto en el aire y el suelo. Hebhoub et al. (2011) realizaron pruebas mecánicas en la producción de hormigón sustituyendo áridos naturales por residuos del mármol en Argelia. Mientras que Santos et al. (2012) propusieron reutilizar los residuos del mármol como insumo en la construcción de obras civiles.

En Palestina, Abu Hanieh et al. (2014) propusieron un modelo sostenible a través de la técnica de *rosquillas* y las 3R –reciclar, reprocesar y reutilizar– como una estrategia responsable de los residuos de esta industria. Jehangir et al. (2015) reportaron que los diversos procesos internos y externos de empresas en Pakistán generaron riesgos de enfermedades pulmonares y accidentes traumáticos. Ozcelik (2016) estudió el impacto ambiental generado por cuatro efluentes de canteras de mármol de Turquía, evidenciando el deterioro de los servicios ambientales. Ayber et al. (2017) reportaron que los factores que inciden en la seguridad laboral son las máquinas y herramientas sin dispositivos de protección en su operación; iluminación deficiente en los procesos de corte que afectan directamente en la productividad y la calidad en la transformación del mármol. Mulk et al. (2017) analizaron la calidad del agua, los sedimentos y peces presentes en la cuenca hidrográfica de Barandú, en Turquía; se percataron del daño a la fauna acuática, lo que resultó en una disminución de dicho servicio ambiental. Carretero et al. (2018) analizaron la importancia de la industria del mármol para la población de Almería y Andalucía. Bai et al. (2019) establecieron un marco de apoyo para la producción limpia, en la

al., 2019; Mulk et al., 2017; Abu Hanieh et al., 2014; Salem, 2021; Secretaría de Economía, 2020; 2021); desarrollo económico y social (López et al., 2019; Secretaría de Minería, 2021; Carretero et al., 2018). En este sentido, la creciente preocupación por las consecuencias ambientales que genera la extracción y transformación de mármol ha impulsado el desarrollo de planes de gestión y desarrollo de normas destinados a mitigar los impactos ambientales de la industria de mármol en el agua, suelo y aire, para garantizar su sostenibilidad a largo plazo (Afzal et al., 2023; Raza et al., 2020).

3. Resultados y discusión

3.1. Explotación y extracción del mármol en México

En México, la participación del sector de la minería en el Producto Interno Bruto (PIB), en 2021, fue de 5.2%, al cual contribuyeron 51 centros productores del mármol con 468 501.58 toneladas de mármol, granito y marmolina en 2020, con producción promedio de los últimos 5 años en más de 3400.00 toneladas anuales (Secretaría de Minería, 2021). En este universo de empresas marmoleras, Sandoval et al. (2017) reportan que solo entre el 25% y 30% tienen canteras propias. También, la extracción, transformación y comercialización del mármol se realizan por empresas instaladas cerca a los yacimientos de mármol y ónix (López et al., 2019). De forma similar a otros países, el proceso de extracción inicia con la eliminación del manto verde (Salem, 2021), luego se determina la morfología, el dimensionamiento de la beta y se caracteriza en los elementos que lo integran, como lo son la arena, la tierra y otros minerales. Durante la extracción, en el mejor de los casos, se utilizan tractores cargadores o tractores adaptados para el movimiento de las rocas, barrenadoras neumáticas y herramientas manuales como el marro, el cincel o el hilo diamantado. En el peor de los casos, la cantera es demolida mediante explosivos para separar bloques dimensionales de mármol (Figura 4). Posterior a la extracción, los bloques se transportan hacia las fábricas en camiones con plataforma. Estas condiciones de trabajo son similares a lo reportado por Ponce et al. (2020). Los problemas de aprovechamiento de la cantera que enfrenta la industria en México son también similares a los que hay a nivel internacional, sobre todo en países emergentes (Ayber et al., 2017; Bai et al., 2019; Pappu et al., 2020; Salem, 2021).



Figura 4. a) Extracción por perforación, b) extracción por hilo diamantado, c) extracción por uso de explosivos.

Fuente: Fotografía propia de Canteras de Coyotepec y Moralillo.

Figure 4. a) Extraction by drilling, b) extraction by diamond wire, c) extraction by use of explosives.

Source: Own photography of Coyotepec and Moralillo Quarries.

En las dos regiones marmoleras de México, la transformación de la piedra y la comercialización, así como las actividades de gestión y organización administrativa, la mano de obra, el nivel de tecnología, la vinculación colaborativa y el contexto ambiental de la industria tienen dinámicas productivas y de gestión similares. En lo general, las empresas marmoleras carecen de una estructura formal organizacional en la cual, el dueño es quien gestiona y administra el negocio (Sandoval et al., 2017), y la mano de obra se especializa con el paso del tiempo en el trabajo. Por el contrario, muestran atraso tecnológico de la maquinaria utilizada e impactan en las diferentes formas de vida circunvecinas, con externalidades negativas generadas por los residuos. En estas zonas, la comercialización local la realiza la propia empresa, mientras que fuera de su territorio se hace mediante intermediarios (Secretaría de Economía, 2021). Las empresas trabajan principalmente en artículos tradicionales y son resistentes al desarrollo de nuevos productos, así como a la adopción de nuevas prácticas de trabajo y de comercialización. En este contexto administrativo, cuando menos el 30% del personal que labora en las

empresas marmoleras de la Región 1 no recibe una capacitación en las actividades relacionadas con la extracción y transformación del mármol (Sandoval et al, 2017), mientras que en la Región 2, la mano de obra se especializa con el tiempo de trabajo, y solo dos de diez empresas tienen inducción al trabajo sin programas de capacitación (García et al., 2017). En ambas regiones, los residuos sólidos y efluentes derivados del proceso de extracción de la piedra en canteras y los procesos de preparación de mármol tienen gran impacto ambiental (Morales et al., 2017; Ponce Palafox et al., 2020). En los dos casos, existen reportes de enfermedades respiratorias y accidentes laborales relacionados con las operaciones (Santos et al., 2012; García et al., 2017).

Para atender estos problemas en esta industria, resulta importante definir estrategias de valor *hacia adelante* y *hacia atrás* (Mendoza, 2006). Al respecto, Aguilar (2020) y Sandoval et al. (2017) han recomendado actividades *hacia atrás* relacionadas con inventarios, profesionalización del personal, planeación y control de producción, pronóstico de demanda y diversificación de la presentación del mármol para su venta al cliente final. Para las actividades *hacia adelante* de la cadena de suministro debería considerarse más de un canal de comercialización, asociarse con organismos de servicios especializados en asesoría y la manipulación del mármol. Por último, para las actividades *más hacia adelante*, por ejemplo, deben definirse estrategias eficientes para reciclar los residuos del corte del mármol y los lodos que se generan de los procesos, estas actividades estratégicas, se precian en la Figura 5.



Figura 5. Actividades de valor para la industria del mármol en México.

Fuente: Adaptación propia a partir de Mendoza (2006).

Figure 5. Value activities for the marble industry in Mexico.

Source: Own Adaptation from Mendoza (2006).

Las partes interesadas en esta industria tienen presencia en diversos eslabones de la cadena productiva. Por ejemplo, cuando se extrae el mármol pueden contratarse los servicios de extracción de rocas por dinamitado o el transporte para piedras dimensionales, así como para la comercialización de *planchas* de mármol.

Otras partes interesadas son los proveedores de servicios de capacitación, sobre todo para los empleados administrativos. La intervención de los gobiernos en este sector industrial tiene el propósito de regular la operación de esta industria. Otras partes interesadas son las sociedades cooperativas y las agrupaciones informales de los empresarios marmoleros, las entidades financieras, así como las instituciones de Educación Superior, las cuales han intervenido en los últimos 15 años en actividades de investigación para conocer el estado que guarda esta industria, desde la perspectiva social, ambiental y de operación. Sin embargo, se han dejado abiertos estudios que analicen el tejido industrial con el objetivo de identificar la dinámica productiva, el desempeño logístico y ambiental con enfoque hacia la sostenibilidad, a partir de las tecnologías implicadas y la dimensión de los problemas ambientales e injusticia social de esta industria. La Figura 6 sintetiza la interacción de las partes interesadas en este sector. Obsérvese que como marco de esta Figura 6, se ha descrito la fuente de información de la cual se obtiene esta interacción.

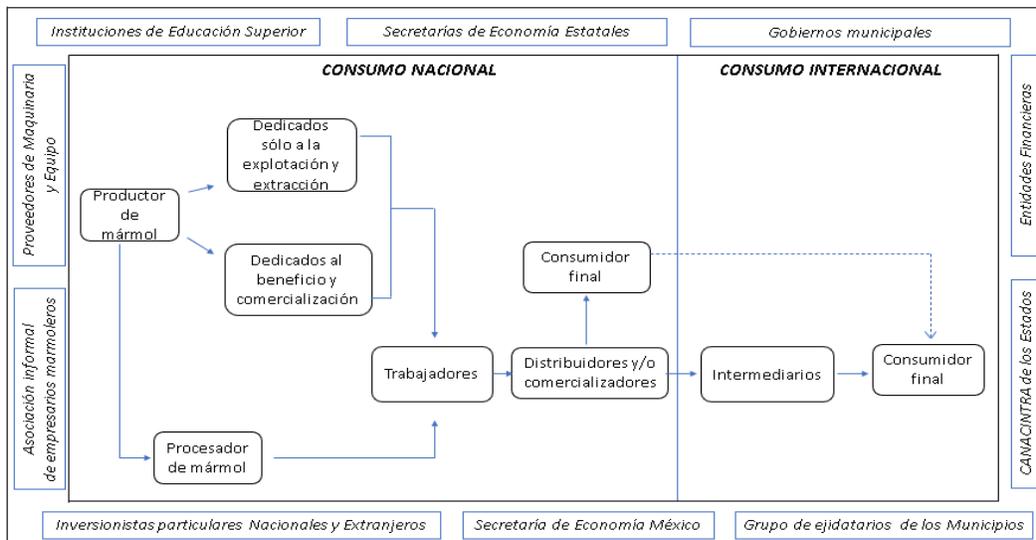


Figura 6. Interacción de las partes interesadas en la cadena productiva del mármol en México.

Fuente: Elaboración propia a partir de la Secretaría de Economía México (2021).

Figure 6. Interaction of the stakeholders in the marble production chain in Mexico.

Source: Own elaboration from the Ministry of Economy Mexico (2021).

3.2. Producción, extracción y transformación del mármol: caso Tepexi de Rodríguez, Puebla, en México

La Figura 7 describe la cadena de suministro del mármol de Tepexi de Rodríguez, en Puebla. Se caracteriza por cuatro agentes económicos en la red de proveeduría y por la intervención de operadores logísticos de transporte (Secretaría de Economía, 2021). Para la extracción del mármol (eslabón 1), se barrena la piedra para extraer los bloques. El movimiento de las rocas se realiza con maquinaria, mientras que perforadoras y taladros neumáticos, barretas, cinceles y martillos son utilizados para limpiar las aristas del bloque de piedra. En este eslabón, el trabajador determina basándose en su *expertis* el estado físico del bloque y la cantidad estimada de metros cúbicos que serán transformados. En el segundo eslabón, el bloque de mármol se almacena en un espacio temporal dentro de la empresa; posteriormente se le realizan cortes verticales y horizontales según sea requerido en producción.

Finalmente, los cortes se trasladan al área de pulido y abrillantado. La dimensión de las planchas de mármol en las empresas marmoleras de Tepexi de Rodríguez, Puebla, tienen generalmente las siguientes medidas mínimas: 30 cm de largo-libre y 40 cm de largo-libre. Los cortes en loseta y otros cortes son de 30 cm x 30 cm; 40 cm x 40 cm; 30 cm x 15 cm; 30 cm x 10 cm y 10 cm x 10 cm. La venta de estas planchas de mármol se lleva a cabo en talleres y en puntos de venta establecidos por los propietarios de las empresas marmoleras o por agentes nacionales. Las ventas internacionales se realizan por agentes mayoristas. El transporte y la logística de distribución se hace en transporte propio o se contrata el servicio a un tercero en función de los costos y la disponibilidad.

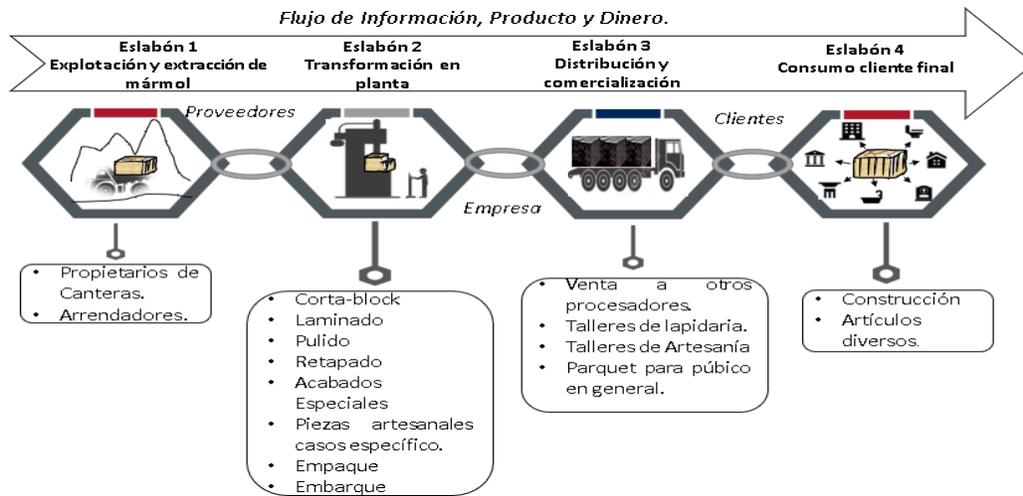


Figura 7. Cadena de suministro de la industria marmolera en México.
 Fuente: Elaboración propia a partir de la Secretaría de Economía de México (2021).
Figure 7. Supply chain of the marble industry in Mexico.
 Source: Own elaboration from the Ministry of Economy of Mexico (2021).

La Figura 8 describe el proceso de transformación de las piedras dimensionales de mármol, en la que, al igual que en los países orientales, los mayores costos logísticos se presentan en la explotación y el transporte de las piedras dimensionales hacia la empresa marmolera, mediante un servicio subcontratado con operadores logísticos locales. En esta red de proveeduría, la relación entre agentes económicos se realiza por pedidos en producción por lotes, y no se tienen programas de producción mayores a un mes de trabajo. Esta ausencia de información de la demanda del producto provoca que cada empresa marmolera realice sus actividades de explotación de las minas de acuerdo con su trabajo histórico, lo cual repercute en la desarticulación de la producción con las necesidades de su mercado.

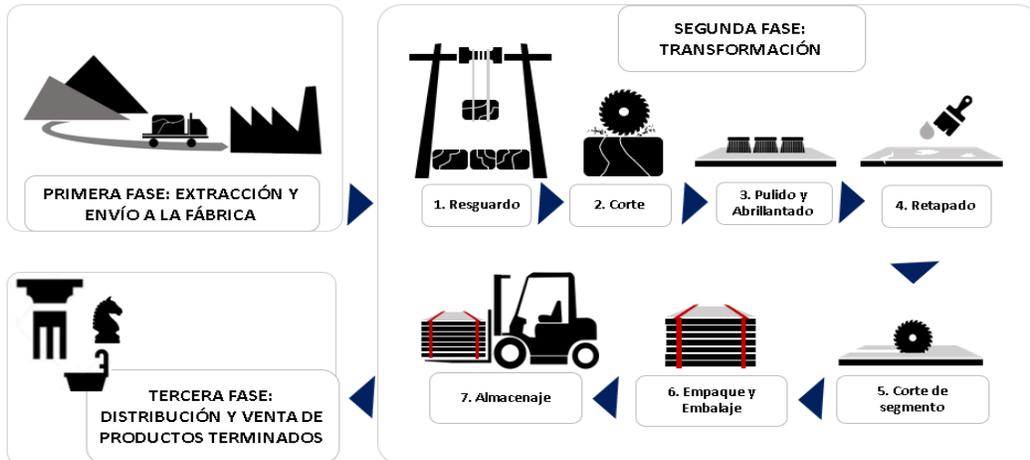


Figura 8. Transformación del mármol.
 Fuente: Elaboración propia a partir de la Secretaría de Economía de México (2021).
Figure 8. Transformation of marble.
 Source: Own elaboration from the Ministry of Economy of Mexico (2021).

En la extracción y transformación del mármol, las dos regiones marmoleras en México enfrentan constantes desafíos en el aprovechamiento de la roca. En la Región 1, la Secretaría de Economía (2018) reporta un atraso tecnológico de la maquinaria, ya que el 77% de las empresas trabajan con tecnología anterior al año 2000

(Sandoval et al., 2017). Mientras que en la Región 2, hemos encontrado que la maquinaria usada tiene tecnología que abarca de 1980 al 2000, además el mantenimiento preventivo o correctivo no es especializado, y se realiza con arreglos improvisados. Estas condiciones tecnológicas pueden ser la fuente de los problemas recurrentes de la fragmentación del bloque de piedra que lo hace inutilizable por su constitución polimineral (Figura 9a); por fracturas externas e internas de la roca cuando se obtiene de la cantera (Figura 9b); por la laminación del bloque de piedra durante el proceso de corte de la roca (Figura 9c).

El resultado de los defectos morfológicos en rocas dimensionales se atribuye al empirismo durante la extracción de la beta de mármol, aunado a la falta de estudios geológicos de la dureza, presencia de impurezas y grado de metamorfismo del mármol a extraer.

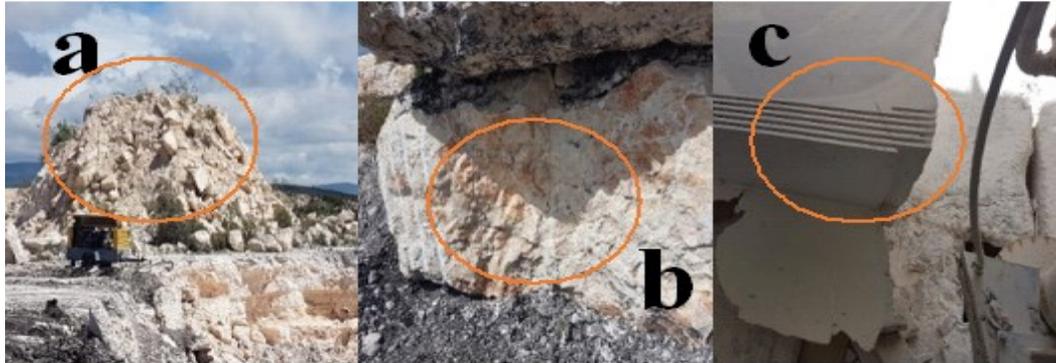


Figura 9. Defectos morfológicos del mármol durante la extracción de la roca: a) roca polimineral, (b) fragmentación interna y externa de la roca, (c) laminación de la roca.

Fuente: Fotografía propia de Canteras de Coyotepec y Moralillo, Puebla, México.

Figure 9. Morphological defects in marble during rock extraction: a) polymineral rock, b) internal and external fragmentation of the rock, c) rock rolling.

Source: Own photography of Quarries of Coyotepec and Moralillo, Puebla-Mexico.

Otro reto de esta industria con impacto social-ambiental es el alto consumo de agua en la transformación del mármol. El Registro Público de Derechos de Agua en México estima un consumo anual superior a los 472.53 hm³ de agua para este sector. Sin embargo, el volumen puede ser superior a esta cifra hasta en 2.4 veces más (Salgado, 2021). En nuestro país, la operación de corte, pulido y abrillantado de mármol utiliza agua como principal insumo entre las operaciones de transformación para enfriar los discos de corte y como lubricante para los abrasivos utilizados en el brillado. El efluente que se genera (Figura 10a) contiene sólidos de carbonato de calcio en concentraciones de 94% a 96% y otros componentes (Santos et al., 2012). Las empresas marmoleras del municipio de Tepexi de Rodríguez almacenan el agua de descarga en piletas con el propósito de reutilizarla por decantación (Figura 10b). Sin embargo, el alto consumo ha impactado en la disminución de los cuerpos de agua. Por ejemplo, en el municipio se ha reportado que la disminución del caudal del río Axamilpa es por el consumo excesivo de agua en las operaciones de esta industria (Miranda et al., 2015). Ante esta situación, el Gobierno municipal generó un plan emergente mediante perforaciones exploratorias para obtener agua potable y distribuirla en las comunidades afectadas (Gobierno Municipal de Tepexi de Rodríguez, 2019).



Figura 10. Laguna de efluentes del corte y abrillantado de mármol a cielo abierto: a) poza natural, b) estanque artificial.

Fuente: Fotografía propia en patios traseros de empresas marmoleras.

Figure 10. Lagoon of effluents from the open-air cutting and polishing of marble: a) natural pool, b) artificial pond.

Source: Own photography in backyards of marble companies.

Las prácticas ineficientes, tanto dentro como fuera de las empresas, con impactos en los riesgos laborales en la extracción y transformación del mármol (Secretaría de Economía, 2021), generan altas cantidades de pedacería y de polvos desde la extracción y el *cuadreado* de la piedra en la cantera, y durante las operaciones del corte, pulido y acabado (Betancourt, et al., 2015). García et al. (2017) han reportado para la región mixteca poblana la generación de 199 584 kilogramos anuales de desperdicio de mármol tan solo en las operaciones de corte, pulido y acabado, mientras que, en la Comarca Lagunera, Ponce-Palafox et al. (2020) reportaron un volumen aproximado de 400 290 kilos anuales en las operaciones de extracción en cantera, a esto se suma las operaciones de corte, pulido y acabado por estas empresas. En coincidencia con Santos et al. (2012), estas cifras advierten el gran daño a la salud pública y del impacto ambiental en el manto verde (Figura 11). La acción del calor y el aire sobre el desperdicio del mármol produce un *polvillo* que circula por el ambiente, y al ser respirado por las personas que viven cerca de estos vertederos, que de acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente (SEMA, 2017), a mediano y largo plazo se reportan enfermedades respiratorias, irritación de ojos, rinitis alérgica y, en casos más severos, el desarrollo de silicosis y asma bronquial. Por ejemplo, en la región de la Comarca Lagunera, la dispersión aérea del polvo del mármol contribuye a la formación de *tolvaneras*, también conocidas como *lluvias laguneras*.



Figura 11. Apilado de residuo del mármol a cielo abierto en la región mixteca, en Puebla, México.

Fuente: Fotografía propia.

Figure 11. Heap of open-air marble waste in the mixteca region, at Puebla, Mexico.

Source: Own photography.

Uno de los problemas más significativos es la desarticulación de la cadena productiva (Alarcón et al., 2021). El contexto productivo entre los actores de la cadena de suministro de la industria del mármol en la región mixteca poblana resalta deficiencias de prácticas logísticas y productivas, lo que hace evidente la desintegración de sus eslabones desde la extracción de la piedra y entre todos sus actores económicos, lo cual conlleva externalidades negativas que afectan las dimensiones social, económica y ambiental. Aquí, Polo (2006) y Salem (2021) coinciden que para mejorar el desempeño de la industria del mármol debe existir equilibrio entre las actividades productivas, logísticas, en relación a la sociedad, todas ellas sujetas a las regulaciones ambientales y directrices que enmarcan los objetivos del desarrollo sostenible. Con especial énfasis, los estudios coinciden en la necesidad de sistematizar y controlar los procesos de extracción y transformación del mármol, fortalecer la seguridad, higiene y salud laboral, así como extender los beneficios de esta industria a la sociedad, con el objetivo de promover el bienestar del medio ambiente, la biodiversidad y los ecosistemas inmersos en los que se asienta esta industria. En todo caso, es evidente a nivel nacional e internacional, la necesidad de implementar buenas prácticas para la extracción y la transformación de la roca, además de la gestión logística centrada en disminuir los desperdicios a lo largo de toda la cadena de valor productiva (Ahmad et al. 2022). Lo que encontramos en el aspecto productivo y logístico en la región mixteca poblana, coincide con lo reportado por Ayber et al. (2017) para Turquía, y lo reportado por Pappu et al. (2020) en el estado de Rajasthan, India. La industria del mármol de Turquía, India y Pakistán trabaja con tecnología desactualizada; utilizan herramientas, maquinarias y equipos manuales que solo cumplen las funciones básicas para la extracción y transformación del mármol. Esto no es diferente para México, y observamos que García et al. (2017); López et al. (2010) y Aguilar (2020) reportan el uso de maquinaria con retraso tecnológico, la cual ha sido acondicionada mecánicamente por los mismos trabajadores, debido a los altos costos de mantenimiento que resultan para la empresa. En todo caso, puede asumirse que la deficiencia de los procesos puede ser en consecuencia no solo del retraso tecnológico implicado en sus procesos, sino también de la ausencia de prácticas de gestión y organización.

Los hallazgos encontrados en la literatura hacen evidente que las externalidades negativas con impacto en el ambiente y la sociedad, al igual como se reporta en Turquía (Ayber et al., 2017) y Palestina (Salem, 2021) son resultado de la aplicación de métodos de trabajo basados en el empirismo, el uso de tecnologías obsoletas y de actividades realizadas por personal improvisado ubicado en las diferentes actividades de la empresa. Esto no es diferente para Brasil, en donde Da Silva et al. (2019) reportan para diferentes áreas de trabajo, niveles de

ruido e iluminación fuera de sus normas vigentes. Esta situación tampoco es diferente para México. Aquí Aguilar (2020) reporta para la región mixteca poblana problemas de bajas eficiencias en la extracción de la piedra, que se atribuyen a la ausencia de estudios previos de la cantera para la extracción de la roca, entre otros aspectos tecnológicos a los que están sometidas las empresas de este sector industrial. Aquí, la industria del mármol en la mixteca poblana requiere de actualización tecnológica en sus procesos de extracción y tratamiento. Alarcón et al. (2022) destacan que el sector marmolero de esta región, en su gran mayoría, está constituido por microempresas, por lo que se requiere de inmediato resolver problemas de organización y administración. Y para lograrlo, es importante definir estrategias de valor *hacia adelante* y *hacia atrás* como se propone en la Figura 3 en este artículo.

Por otra parte, los problemas socioambientales están relacionados con la remoción del manto verde, como lo reporta Salem (2021), así como el daño a la salud poblacional por la generación del polvo de mármol (Guo et al., 2020); el consumo incontrolado de agua y la generación de efluentes con alto contenido de sólidos disueltos (Miranda et al., 2015; Mulk et al., 2017; Noreen et al., 2019), y la generación incontrolada de desperdicios en el corte y abrillantado del mármol (Awad et al., 2020; Pappu et al., 2020). Estos problemas, en mayor o menor grado, son comunes tanto en México como en los países que tienen asentada la industria del mármol; y cada uno de estos estudios reporta estrategias para impulsar una industria sostenible desde la extracción y transformación del mármol de forma amigable a partir de normas, leyes y estándares como lo plantea Salem (2021).

En este contexto, Morales et al. (2017) y García et al. (2017) evidencian que las afectaciones al ambiente, así como la generación incontrolada de desperdicios durante la extracción y transformación del mármol en Tepexi de Rodríguez, Puebla, prevalecen como una problemática productiva y socioambiental no solo en esta región, sino también en el orden internacional como una tarea de política pública inconclusa. Recientemente, Alarcón et al. (2022) evalúan el nivel de desempeño logístico y ambiental de la industria del mármol de la mixteca poblana. Y reportan que desde la etapa de extracción de mármol, en promedio, se aprovecha 32% de cada roca dimensional extraída de la cantera, y el resto se convierte en desperdicio. Además, informan que no existen métricas de evaluación que ayuden a ubicar de manera cuantitativa el desempeño productivo y su dinámica medioambiental. Terminan con la conclusión de que definitivamente la problemática ambiental generada por esta industria sigue vigente en esta región de la mixteca poblana sin la implicación clara de ventajas productivas ni de políticas públicas.

En México, como en el orden internacional, Ayber et al. (2017) reportan un bajo desempeño laboral de los trabajadores, mientras que Betancourt et al. (2015) y Mulk et al. (2017) resaltan las afectaciones relacionadas con la calidad de vida de las personas que interactúan con la industria del mármol en el país. En cualquiera de los casos, es urgente que las empresas marmoleras gestionen acciones de higiene, seguridad y medio ambiente, tal como lo hace notar Ayber et al. (2017) en Palestina, y como lo señalan Bai et al. (2019) al aportar estrategias para mejorar el desempeño de los trabajadores en términos de sostenibilidad en China. También en México, Santos et al. (2012), Betancourt et al. (2015) y García et al. (2017) resaltan especialmente la necesidad de proteger a los trabajadores ante los riesgos de golpes traumáticos, aplastamientos, exposiciones a altos niveles de ruido y respiración de polvos de mármol, lo cual sin duda alguna mejoraría las condiciones de trabajo e incrementaría la productividad. En este sentido, los daños a la salud no se limitan a los trabajadores, sino también a la población que reside cerca de las regiones marmoleras. Por ejemplo, en México, como en cualquier parte del mundo, llega a observarse la formación de turbulencias de polvo en el ambiente, o el apilamiento de escombros de piedra mármol a cielo abierto, similar a lo reportado en Pakistán (Mulk et al., 2017; Noreen et al., 2019) y en Palestina (Salem, 2021), con los efluentes que han contaminado cuerpos de agua. Las afectaciones a la salud provocadas por respirar el polvo pueden ir desde la irritación ocular, estornudos, tos y, en el peor de los casos, enfermedades respiratorias pulmonares (Guo et al., 2020). Este es un problema de salud laboral y social que no ha sido tratado, sino solo reportado.

La industria marmolera de la mixteca poblana concentra 13.1% de las unidades económicas en Tepexi de Rodríguez en Puebla, México (Gobierno Municipal Tepexi de Rodríguez, 2021), mientras que, el Valor Agregado Censal Bruto para esta actividad minera se ubica en la cuarta posición con un valor de \$16.37 (Gobierno de Puebla, 2019). Sin embargo, a pesar de la bondad lucrativa, es conveniente resaltar que esta industria presenta retos y oportunidades internos y externos a ella que deben atenderse.

3.3. Análisis de la dinámica productiva: caso Tepexi de Rodríguez, en Puebla, México

Con base en este estudio y la observación en campo, la dinámica productiva de la industria del mármol en Tepexi, Puebla, México, puede clasificarse en tres áreas clave: producción, social y ambiental. En términos de producción, se abordan aspectos como la seguridad laboral, la organización empresarial, la tecnología y eficiencia, y la capacitación laboral. En el ámbito social, se examinan la mano de obra, la especialización y las condiciones laborales. Mientras que, en el plano ambiental, se evalúa el impacto ambiental y los problemas geológicos asociados con la extracción. Los hallazgos se describen de la siguiente manera:

Producción

- Seguridad laboral:
 - La maquinaria y las herramientas sin dispositivos de protección afectan la seguridad laboral.
 - La iluminación deficiente durante los procesos de corte influye en la productividad y calidad en la transformación del mármol.
- Organización empresarial:
 - Las empresas carecen de una estructura formal organizacional.
 - Los propietarios gestionan y administran el negocio, mostrando resistencia al desarrollo y a la adopción de nuevas prácticas.
- Tecnología y eficiencia:
 - Atraso tecnológico en la maquinaria utilizada.
 - Las prácticas ineficientes generan residuos sólidos y efluentes con impacto ambiental.
- Capacitación laboral:
 - Deficiencia en la capacitación, con hasta un 30% del personal sin formación adecuada.

Social

- Mano de obra y especialización:
 - La mano de obra se especializa con el tiempo, pero la capacitación es deficiente.
 - Resistencia al desarrollo de nuevos productos y de prácticas de trabajo y comercialización.
- Condiciones laborales:
 - Reportes de enfermedades respiratorias y accidentes laborales relacionados con las operaciones.

Ambiental

- Impacto:
 - Los residuos sólidos y efluentes derivados del proceso de extracción y transformación del mármol tienen un gran impacto ambiental.
- Problemas geológicos y extracción:
 - Deficiencia en la extracción atribuida a la falta de estudios geológicos de la cantera.

Otros aspectos:

- Partes interesadas:
 - Involucrados intervienen en eslabones de la cadena productiva, como proveedores de servicios, gobiernos, cooperativas y entidades financieras.
- Internacionalización y logística:
 - Las ventas internacionales se realizan a través de agentes mayoristas.
 - El transporte y la logística se gestionan internamente o mediante servicios subcontratados.

Esta clasificación permite una comprensión integral de los desafíos y oportunidades que caracterizan la industria del mármol en esta región. En este sentido, este manuscrito es un punto de partida para que académicos y empresarios de esta industria prioricen su agenda de investigación.

4. Conclusiones

La industria del mármol en la región mixteca de México presenta una dinámica productiva compleja, donde diversos actores económicos interactúan en una cadena de suministro marcada por deficiencias logísticas y

productivas. La desarticulación entre los eslabones, desde la extracción hasta la comercialización, revela una falta de coordinación que afecta la eficiencia y la sostenibilidad. La tecnología desactualizada, la improvisación en procesos y la ausencia de prácticas de gestión contribuyen a problemas recurrentes, como el bajo aprovechamiento de la roca. Además, la falta de métricas de evaluación cuantitativa dificulta la comprensión precisa del desempeño productivo y medioambiental. La relación entre los agentes económicos, desde dueños de empresas hasta trabajadores, se caracteriza por una estructura organizacional informal, donde el propietario asume roles administrativos. La mano de obra, en su mayoría no capacitada, enfrenta riesgos laborales, desde golpes traumáticos hasta exposición a altos niveles de ruido y polvos de mármol. Estos impactos se extienden a la salud de la población circundante, lo que evidencia externalidades negativas.

Las implicaciones técnicas de la industria del mármol en el caso Tepexi de Rodríguez, en Puebla, México, que dieron origen a las preguntas de investigación, pueden resumirse en lo siguiente:

- **Implicaciones para la integración productiva y logística:** la cadena de suministro del mármol en Tepexi de Rodríguez revela una desarticulación productiva con limitada planificación y demanda del producto, afectando la eficiencia y la capacidad de integración logística. La falta de información sobre la demanda comercial provoca la realización de actividades de extracción basadas en históricos, generando así desequilibrios en la cadena y resaltando la necesidad de estrategias coordinadas y programación a largo plazo.
- **Impacto de externalidades negativas en la dinámica productiva:** las externalidades negativas, como la generación de residuos y el consumo descontrolado de agua, obstaculizan la sostenibilidad de la industria del mármol. Estos problemas, compartidos internacionalmente, resultan de tecnologías obsoletas y prácticas no sostenibles, por lo que es imperante la actualización tecnológica, las regulaciones ambientales más estrictas y las métricas cuantitativas para evaluar el desempeño medioambiental.
- **Implicaciones prácticas de la salud laboral-social en el desempeño productivo:** la falta de medidas de seguridad laboral, como el uso de tecnologías desactualizadas, contribuye a un bajo desempeño laboral y afecta la calidad de vida de los trabajadores. La gestión ineficiente de riesgos, la exposición a polvos de mármol y la ausencia de capacitación contribuyen a problemas de salud, por ello se subraya la urgencia de acciones para mejorar las condiciones laborales y elevar la productividad.

En este contexto, se sugieren dos líneas de investigación vitales para el desarrollo futuro de esta industria. Primero, se propone explorar estrategias para optimizar la gestión logística y productiva, mejorando la coordinación y reduciendo los desechos. Segundo, se enfatiza la necesidad de desarrollar prácticas sostenibles y seguras, que aborden la actualización tecnológica, las normas ambientales y políticas de seguridad laboral. Estas líneas de investigación no solo plantean problemas existentes, sino que también apuntan a transformar la industria del mármol hacia un modelo más eficiente y sostenible, tal y como se describe a continuación:

- **Optimización de prácticas logísticas y producción sostenible:** investigar estrategias específicas para mejorar la planificación y coordinación en la cadena de suministro del mármol, incorporando tecnologías modernas y prácticas sostenibles, así como la aplicación de métodos que reduzcan el desperdicio, mejoren la eficiencia en la extracción y transformación, y promuevan una integración más eficaz con la demanda del mercado.
- **Desarrollo de políticas y normativas ambientales:** realizar investigaciones centradas en el diseño e implementación de políticas y normativas ambientales específicas para la industria del mármol en Tepexi de Rodríguez. Estas regulaciones deben abordar la gestión sostenible del agua, la reducción de residuos y la adopción de tecnologías más limpias. Se busca establecer un marco normativo que fomente la responsabilidad ambiental.

La prioridad entre las dos líneas de investigación depende de los objetivos y valores específicos de la comunidad, las instituciones involucradas y las demandas del entorno. Sin embargo, considerando la naturaleza interconectada de ambos aspectos, se podría argumentar que la optimización de prácticas logísticas y la producción sostenible podría ser más dependiente de sus actores en la cadena de suministro. En este contexto, mejorar las prácticas logísticas y de producción contribuiría directamente a la eficiencia operativa

y a la reducción de costos, aspectos cruciales para la competitividad de las empresas; la optimización de procesos puede generar beneficios inmediatos, como la disminución de desperdicios y una mayor rentabilidad empresarial; la implementación de tecnologías modernas en la cadena de suministro podría proporcionar resultados rápidos y tangibles, afectando positivamente la dinámica productiva.

5. Información adicional

No.

6. Agradecimientos

A las empresas marmoleras Intermármol S.A de C.V., Mármoles RocaDura S.A de C.V. y Mármoles Tres Hermanos S.A. de C.V., por su interés en esta investigación. Y de manera especial al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología de México (Conahcyt).

Información de los autores

Teodoro Alarcón Ruiz  <https://orcid.org/0000-0003-2097-4139>

Luis Enrique García Santamaría  <https://orcid.org/0000-0002-0430-9481>

Eduardo Fernández Echeverría  <https://orcid.org/0000-0002-5289-1568>

Ma. Loecelia G. Ruvalcava-Sánchez  <https://orcid.org/0000-0002-4225-9032>

Gregorio Fernández Lambert  <https://orcid.org/0000-0002-4259-296X>

Contribución de los autores en el desarrollo del trabajo

Los autores declaran que contribuyeron por igual para la realización de esta investigación.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

Referencias

- Abu Hanieh, A., AbdElall, S. y Hasan, A. (2014). Sustainable development of stone and marble sector in Palestine. *Journal of Cleaner Production*, 84, 581-88. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.045>
- Afzal, U., Shah, W. y Khan, E. (2023). Environmental Management Plan for Marble Industry. *International Review of Social Sciences*, 11(2), 1-5. https://irss.academyirmbr.com/paper_details.php?title=Environmental_Management_Plan_for_Marble_Industry
- Aguilar, C. (2020). Caracterización de la cadena productiva del mármol-travertino en el Estado de Puebla, México. *Repositorio de la Red Internacional de Investigadores en Competitividad* 12, 990-1011. <https://acortar.link/mHVm7T>
- Ahmad, T., Hussain, M., Iqbal, M., et al. (2022). Environmental, energy, and water footprints of marble tile production chain in a life cycle perspective. *Sustainability*, 14(14), 8325. <https://doi.org/10.3390/su14148325>
- Ahmed, F. S., AbdulRazak, A. A. y Alsaffar, M. A. (2022). Modelling and optimization of methylene blue adsorption from wastewater utilizing magnetic marble dust adsorbent: A response surface methodology approach. *Materials Today: Proceedings*, 60(3), 1676-1688. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.224>
- Alarcón, T., Santiago, E., Ruvalcaba, G., et al (2022). A Triple-Helix Intervention Approach to Direct the Marble Industry towards Sustainable Business in Mexico. *Sustainability*, 14(9), 5576. <https://doi.org/10.3390/su14095576>
- Ayber, S. y Haktanirlar, B. (2017). Assessing Sustainable Manufacturing Related Problems for Marble Facilities: An Application. *Procedia Manufacturing*, 8, 129-135. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.015>
- Awad, A. H., Abdel-Ghany, A. W., El-Wahab, A. A. A., et al. (2020). The influence of adding marble and granite dust on the mechanical and physical properties of PP composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 14C(2020), 2615-2623. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09030-w>
- Bai, S., Hua, Q., Cheng, L. J., et al. (2019). Improve sustainability of stone mining region in developing countries based on cleaner production evaluation: Methodology and a case study in Laizhou region of China. *Journal of Cleaner Production*, 207, 929-950. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.026>

- Bentlemsan, N., Yahiaoui, W. y Kenai, S. (2023). Strength and durability of self-compacting mortar with waste marble as sand substitution. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02331. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02331>
- Betancourt, J. R., Lizágarra, L. G., Narayanasamy, R., et al (2015). Revisión sobre el uso de residuos de mármol, para elaborar materiales para la construcción. *Revista Arquitectura e Ingeniería*, 9(3), 2-12. <https://acortar.link/v6DYhH>
- Carretero, A., De Pablo, J. y Velasco, J. F. (2018). Recursos endógenos mineros y desarrollo territorial. El caso de la comarca del Mármol (Almería, España). *Revista de Estudios Regionales*, 111, 51-75. <https://acortar.link/cF1J4R>
- Corinaldesi, V., Moriconi, G. y Naik, T. R. (2010). Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 24(1), 113-117. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.013>
- Da Silva, J. M., Dos Santos, M. B. G., De Oliveira, R. O. y Pereira, F. (2019). Analysis of Acoustic and Luminic Comfort in a Marble and Granite Processing Company in Campina Grande-PB. *Occupational and Environmental Safety and Health*, 202, 431-438. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14730-3_46
- García, J. A., Morales, G., Cadena, M. H. y Moreno, P. (2017). Experimental and Theoretical Modelling of Waste Produced by the Marble Industry of Tepexi de Rodríguez. *European Journal of Sustainable Development*, 6(3) 405-412. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2017.v6n3p405>
- Gobierno Municipal de Tepexi Rodríguez. (2019, mayo). *Plan Municipal de Desarrollo 2018-2019*. <https://acortar.link/kCABoA>
- Gobierno Municipal de Tepexi de Rodríguez. (2021, diciembre). *Plan Municipal de Desarrollo 2021-2024*. <https://bit.ly/3URtb3D>
- Gobierno de Puebla. (2019). *Desarrollo Regional Estratégico, Región 18 Tepexi de Rodríguez*. <https://bit.ly/3TRHj0n>
- Guo, P., Tian, W., Li, H., et al. (2020). Global characteristics and trends of research on construction dust: based on bibliometric and visualized analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(30), 37773-37789. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09723-y>
- Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., et al. (2011). Use of waste marble aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1167-1171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.037>
- Jehangir, K., Zeshan, A., Bakht, T. K., et al. (2015). Burden of Marble Factories and Health Risk Assessment of Kidney (renal) Stones Development in District Buner, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Expert Opinion on Environmental Biology*, 4(2). <http://dx.doi.org/10.4172/2325-9655.1000115>
- Kuoribo, E. y Mahmoud, H. (2022). Utilisation of waste marble dust in concrete production: A scientometric review and future research directions. *Journal of Cleaner Production*, 374(10), 133872. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133872>
- Lendvai, L., Singh, T. y Ronkay, F. (2024). Thermal, thermomechanical and structural properties of recycled polyethylene terephthalate (rPET)/waste marble dust composites. *Heliyon*, 10(3) e25015. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25015>
- Mehta, D., Kumar, V. y George, S. (2023). Marble waste derived hydroxyapatite: Low-cost adsorbent for the defluoridation of drinking water. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.356>
- Mendoza, R. (2006). Cadenas de valor. Un enfoque poderoso en la nueva competitividad global. *Encuentro*, 73(2006), 47-59. <https://doi.org/https://doi.org/10.5377/encuentro.v0i73.3719>
- Miranda, M., Ocampo, I., Escobedo, J. F. y Hernández, M. D. L. (2015). La distribución del agua potable en Tepexi de Rodríguez, Puebla. *Agricultura, sociedad y desarrollo*. 12(3), 261-277. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722015000300001&lng=es&tlng=es
- Morales, A. M., Flores, T., Hernández, J. A., et al. (2019). Comportamiento de absorción del travertino tipo Puebla procedente del Moralillo, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México. *Revista Electrónica*, 34, 18-29. <https://acortar.link/OYdDCZ>
- Morales, G., Moreno, P., Rodríguez, C. de R., et al. (2017) Proyectos sustentables desarrollados para la Región Mixteca Baja del estado de Puebla, México. *Ingeniería. Solidaria*, 13(22), 9-26. <https://doi.org/10.16925/in.v13i22.1749>

- Mulk, S., Korai, A. L., Azizullah, A., et al. (2017). Marble industry effluents cause an increased bioaccumulation of heavy metals in Mahaseer (*Tor putitora*) in Barandu River, district Buner, Pakistan. *Environment Science and Pollution Research*, 24, 23039-23056. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9921-5>
- Noreen, U., Ahmed, Z., Khalid, A., et al. (2019). Water pollution and occupational health hazards caused by the marble industries in district Mardan, Pakistan. *Environmental Technology Innovation*, 16, 100470. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100470>
- Ozcelik, M. (2016). Environmental pollution and its effect on water sources from marble quarries in western Turkey. *Environment Earth Sciences*, 75(796). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5627-0>
- Pappu, A., Chaturvedi, R. y Tyagi, P. (2020). Sustainable approach towards utilizing Makrana marble waste for making water resistant green composite materials. *Discover Applied Sciences*, 2(347), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2133-5>
- Polo, C. (2006). Los ejes centrales para el desarrollo de una minería sostenible. *CEPAL-SERIE Recursos Naturales e Infraestructura*, 107, 5-55. <https://acortar.link/e3qmCj>
- Ponce, C., Carrillo, J. y López, A. (2020). Fabricación de ladrillos con polvo-residuo de mármol en México. Propiedades físicas y mecánicas del polvo residuo de mármol de la provincia de la Comarca Lagunera, en México. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 22(2), 106-113. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2020.2554>
- Prakash, B., Saravanan, T. J., Syed, K. I. y Bisht, K. (2023). Exploring the potential of waste marble powder as a sustainable substitute to cement in cement-based composites: A review. *Construction and Building Materials*, 401, 132887. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132887>
- Raza, S., Gul, K., Hussain, S., Rehman, Z., et al. (2020). Mitigation Plan for Identified Problems Faced by the Marble Industry in Khyber Pakhtunkhwa. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 39(1), 77-86. <https://doi.org/10.17582/journal.jeas/39.1.77.86>
- Salem, H.S. (2021). Evaluation of the Stone and Marble Industry in Palestine: environmental, geological, health, socioeconomic, cultural, and legal perspectives, in view of sustainable development. *Environmental Science Pollution Research*, 28, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12526-4>
- Salgado, H. J. (2021). Agua y Minería (parte II). *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua México*, 8, 1-3. <https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2021-08>
- Sandoval, R. y Moncayo, M. del R. (2017). Diagnóstico de la industria del mármol en la Comarca Lagunera. *Revista Iberoamericana de Contaduría, Economía y Administración*, 5(9), 1-21. <https://acortar.link/APFwtY>
- Santos, A. C. P., Villegas, N. y Betancourt, J. (2012). Marble waste as construction material. A diagnosis of the Laguna region. *Revista de la Construcción*, 11(2), 17-26. <https://acortar.link/lfrNhs>
- Sarache, W. A., Costa, Y. J., y Martínez, J. P. (2015). Evaluación del desempeño ambiental bajo enfoque de cadena de abastecimiento verde. *Dyna*, 82(189), 207-215. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n189.48550>
- Secretaría de Economía. (2021, enero). *Perfil de mercado del mármol*. <https://acortar.link/qbtaHO>
- Secretaría de Economía. (2021, enero). *Estudio de la cadena productiva del mármol*. <https://acortar.link/K5vnjsj>
- Secretaría de Economía. (2021). *Anuario estadístico de la minería mexicana 2020*. https://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2020_Edicion_2021.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente (2017). Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Coahuila de Zaragoza 2017-2026. <https://acortar.link/GDH3ju>

Bibliografía

- Alyamaç, K. E. y Tunç, E. T. (2014, octubre). A durable, eco-friendly and aesthetic concrete work: marble concrete. *11th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Estambul, Turquía. https://www.researchgate.net/publication/269698461_A_Durable_Eco-Friendly_and_Aesthetic_Concrete_Work_Marble_Concrete_mix
- López, A. y Sánchez, A. (Coord). (2010). *Comarca Lagunera. Procesos regionales en el contexto global* Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://acortar.link/Xnw79o>
- Oller, M. (2021). Origen, evolución y ¿consolidación? de la responsabilidad social corporativa (RSC) en la industria extractiva de mineral: Empresas marmolistas españolas. En R. Pérez, E. Trincado y E. Gallego (Eds.). *Economía, Empresa y Justicia. Nuevos retos para el futuro* (pp. 2392-2426). Dykinson, S.L. <https://acortar.link/fzZnTe>

- Oller, M. (2022). Crisis y responsabilidad social corporativa en la industria del mármol: comarca del Almanzora. En A. Bernabéu-Serrano, J. Herrero-Gutiérrez, T. Hidalgo-Marí (Eds). *La comunicación como herramienta post COVID-19* (pp. 77-90). Editorial Universitas. <https://acortar.link/UrzAf>
- Rangel, B., Garcez, A. R., Monteiro, S. N., et al. (2018). Durability of Soil-Cement blocks with the Incorporation of Limestone Residues from the Processing of Marble. *Materials Research*, 21(1), 1-6. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-1118>
- Servicio Geológico Mexicano. (2019). *Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, 2018*. <https://acortar.link/E6ODbg>
- Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., et al (2018). PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467-473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>