



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.  
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), Noviembre-Diciembre 2025,  
Volumen 9, Número 6.

[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v9i6](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6)

## **TRANSICIÓN HACIA LA SOSTENIBILIDAD EN EL SECTOR DENIM: UN ESTUDIO DE CASO EN PYMES MANUFACTURERAS**

**TRANSITION TOWARD SUSTAINABILITY IN THE DENIM  
SECTOR: A CASE STUDY IN MANUFACTURING SMES**

**Israel Martínez Zárate**

Instituto Tecnológico de Tehuacán

**Iniria Guevara Ramírez**

Instituto Tecnológico de Tehuacán

**Angélica Granados Sánchez**

Instituto Tecnológico de Tehuacán

**Jessica Cruz Manzo**

Instituto Tecnológico de Tehuacán

**Ivan Araoz Baltazar**

Instituto Tecnológico de Tehuacán

DOI: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v9i6.21862](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6.21862)

## Transición hacia la Sostenibilidad en el Sector Denim: Un Estudio de Caso en PYMES Manufactureras

**Israel Martínez Zárate 1**

[israel.mz@tehuacan.tecnm.mx](mailto:israel.mz@tehuacan.tecnm.mx)

<https://orcid.org/0000-0002-7896-784X>

Tecnológico Nacional de México / Instituto  
Tecnológico de Tehuacán  
México

**Iniria Guevara Ramírez**

[iniria.gr@tehuacan.tecnm.mx](mailto:iniria.gr@tehuacan.tecnm.mx)

<https://orcid.org/0000-0002-6390-1661>

Tecnológico Nacional de México / Instituto  
Tecnológico de Tehuacán  
México

**Angélica Granados Sánchez**

[angelica.gs@tehuacan.tecnm.mx](mailto:angelica.gs@tehuacan.tecnm.mx)

<https://orcid.org/0009-0005-4878-4486>

Tecnológico Nacional de México / Instituto  
Tecnológico de Tehuacán  
México

**Jessica Cruz Manzo**

[jessica.cm@tehuacan.tecnm.mx](mailto:jessica.cm@tehuacan.tecnm.mx)

<https://orcid.org/0000-0001-9872-1794>

Tecnológico Nacional de México / Instituto  
Tecnológico de Tehuacán  
México

**Ivan Araoz Baltazar**

[ivan.ab@tehuacan.tecnm.mx](mailto:ivan.ab@tehuacan.tecnm.mx)

<https://orcid.org/0000-0003-0394-2979>

Tecnológico Nacional de México / Instituto  
Tecnológico de Tehuacán  
México

### RESUMEN

El presente estudio analiza la transición hacia la sostenibilidad en el sector denim a través de un estudio de caso desarrollado en pequeñas y medianas empresas manufactureras de Tehuacán, Puebla. La investigación aborda la problemática ambiental derivada del alto consumo de agua y la generación de efluentes contaminantes durante el proceso de lavado y acabado de prendas de mezclilla. Desde un enfoque cualitativo-descriptivo, se recopilaron y examinaron evidencias documentales, técnicas y discursivas para identificar los factores que inciden en la adopción de prácticas sostenibles. Los resultados muestran que, si bien existe un creciente interés por incorporar tecnologías limpias, como el ozono, el láser y los sistemas de recirculación de agua, las PYMES enfrentan limitaciones financieras, falta de capacitación técnica y escasa articulación institucional. La sostenibilidad emerge como una necesidad estratégica para mantener la competitividad, reducir impactos ambientales y fortalecer la responsabilidad social empresarial. El estudio concluye que el avance hacia la sostenibilidad requiere de políticas públicas de apoyo, transferencia tecnológica y una cultura organizacional orientada a la eficiencia de los recursos y la innovación ambiental.

**Palabras clave:** consumo de agua, innovación tecnológica, mezclilla, PYMES manufactureras, sostenibilidad

---

<sup>1</sup> Autor principal.

Correspondencia: [ivan.ab@tehuacan.tecnm.mx](mailto:ivan.ab@tehuacan.tecnm.mx)

# Transition Toward Sustainability in the Denim Sector: A Case Study in Manufacturing SMEs

## ABSTRACT

This study analyzes the transition toward sustainability in the denim sector through a case study conducted in small and medium-sized manufacturing enterprises (SMEs) located in Tehuacán, Puebla. The research addresses the environmental challenges arising from high water consumption and the generation of pollutant effluents during the washing and finishing processes of denim garments. Using a qualitative and descriptive approach, documentary, technical, and discursive evidence was examined to identify the factors influencing the adoption of sustainable practices. The findings reveal that, although there is growing interest in implementing clean technologies, such as ozone, laser, and water recirculation systems, SMEs face financial constraints, limited technical training, and weak institutional coordination. Sustainability emerges as a strategic necessity to maintain competitiveness, reduce environmental impacts, and strengthen corporate social responsibility. The study concludes that advancing toward sustainability requires supportive public policies, technology transfer, and an organizational culture focused on resource efficiency and environmental innovation.

**Keywords:** water consumption; technological innovation; denim; manufacturing SMEs; sustainability.

*Artículo recibido 30 noviembre 2025*  
*Aceptado para publicación: 30 diciembre 2025*



## INTRODUCCIÓN

La industria del pantalón de mezclilla se ha consolidado como uno de los sectores más relevantes de la manufactura textil a nivel global. No obstante, también se le reconoce como una de las actividades con mayor huella ambiental, debido al uso intensivo de agua, productos químicos y energía en sus procesos de teñido, lavado y acabado (Souza et al., 2016; Wahab & Hussain, 2020). Se estima que producir un par de jeans puede requerir entre 30 y 70 litros de agua, además de aproximadamente 150 gramos de productos químicos y 1 kWh de energía eléctrica, lo que genera impactos significativos sobre los cuerpos hídricos y el entorno (Ben Fraj & Jaouachi, 2021; Khan & Jintun, 2021)

La preocupación por la sostenibilidad del sector ha impulsado la búsqueda de alternativas tecnológicas que permitan reducir el consumo de agua y la carga contaminante de los efluentes. En los últimos años, diversas investigaciones han documentado la viabilidad de procesos innovadores como el lavado con ozono, el uso de láser, las nanoburbujas, el sistema e-flow y los tratamientos híbridos de biorremediación y membranas, que logran disminuir drásticamente el uso de agua y productos tóxicos sin comprometer la calidad de las prendas (Eroğlu, 2023; Periyasamy & Periyasami, 2023; Rahaman et al., 2025). Estas tecnologías se alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y el ODS 12 (Producción y consumo responsables), que promueven el uso eficiente de los recursos naturales y la reducción del impacto ambiental industrial (United Nations, 2015).

En el contexto mexicano, la industria del denim ocupa un lugar destacado dentro del sector manufacturero, con polos de producción en Aguascalientes, Puebla, Jalisco y el Estado de México. En particular, Tehuacán, Puebla, se ha posicionado como un referente nacional en la fabricación y acabado de mezclilla, concentrando un número significativo de lavanderías industriales. Sin embargo, esta concentración productiva ha derivado en una sobreexplotación de los acuíferos locales y en la descarga de aguas residuales sin tratamiento adecuado, lo que agrava los problemas ambientales y de salud pública (Registro y Seguimiento de PI, 2025).

Las pequeñas y medianas empresas (PYMES) manufactureras de Tehuacán enfrentan una doble presión: mantener su competitividad en un mercado global altamente exigente y, al mismo tiempo, adaptarse a regulaciones ambientales más estrictas, como las establecidas en la NOM-001-SEMARNAT-2021, que fija los límites permisibles de contaminantes en descargas industriales (Registro y Seguimiento de PI,

2025). A pesar del creciente interés en adoptar tecnologías más limpias, persisten limitaciones financieras, falta de capacitación técnica y escasa articulación con instituciones de apoyo (Nadeem et al., 2024; Uysaler et al., 2025).

La sostenibilidad, por tanto, no puede reducirse únicamente a la incorporación de nuevas tecnologías, sino que requiere una transformación estructural en la cultura organizacional, la gestión del agua y la responsabilidad social empresarial. En este contexto, el presente estudio de caso tiene como propósito analizar los factores que inciden en la transición hacia la sostenibilidad en PYMES manufactureras del sector denim en Tehuacán, Puebla, identificando los retos, avances y oportunidades que definen su actual trayectoria hacia una producción ambientalmente responsable.

## **Revisión de literatura**

### **1. Impacto ambiental del sector denim y consumo de agua**

La industria del pantalón de mezclilla se caracteriza por un uso intensivo de recursos naturales, especialmente agua, energía y productos químicos. Diversos estudios señalan que el proceso tradicional de lavado de jeans puede requerir entre 30 y 70 litros de agua por prenda, alrededor de 150 g de productos químicos y aproximadamente 1 kWh de energía eléctrica, dependiendo del tipo de acabado y el número de etapas involucradas (Ben Fraj & Jaouachi, 2021; Khan & Jintun, 2021).

Si se considera una producción anual de miles de millones de prendas de mezclilla, la magnitud del impacto hídrico y energético resulta crítica: se ha estimado un consumo global de cientos de millones de metros cúbicos de agua destinados únicamente a la etapa de lavado y acabado, sin contabilizar el teñido ni el cultivo de algodón (Ben Fraj & Jaouachi, 2021; Souza et al., 2016). A ello se suma la descarga de efluentes con alta carga de colorantes recalcitrantes, compuestos orgánicos sintéticos, sales, metales pesados y sólidos suspendidos, que alteran el pH, reducen el oxígeno disuelto y afectan la biota acuática (González-López et al., 2024; Rodríguez et al., 2013; Souza et al., 2016).

La dimensión social del problema también ha sido documentada: el uso de agentes blanqueadores como hipoclorito y permanganato, así como otros compuestos peligrosos, expone a los trabajadores a riesgos para la salud, especialmente en contextos con regulación débil y bajos niveles de protección laboral (Vos, 2019; Wahab & Hussain, 2020). En países en desarrollo, donde suele concentrarse una parte importante de la manufactura textil, la combinación de escasez de agua, ausencia de plantas de

tratamiento y concentración industrial ha derivado en afectaciones directas a comunidades, con reportes de enfermedades asociadas al agua contaminada (Catarino et al., 2025; Wahab & Hussain, 2020).

En este contexto, la sostenibilidad del sector denim se ha convertido en un tema central en la agenda de consumidores, reguladores y marcas globales, que demandan procesos más limpios, transparentes y alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), el ODS 12 (Producción y consumo responsables) y el ODS 13 (Acción por el clima).

## 2. Tecnologías y procesos para reducir el consumo de agua en el lavado y acabado de mezclilla.

Las revisiones de Periyasamy & Periyasami (2023) y Khan & Jintun (2021) sintetizan los principales enfoques de innovación de proceso, destacando que tecnologías como el ozono, el láser, el e-flow y el blanqueo enzimático permiten reducir de manera significativa el consumo de agua, químicos y energía frente a los métodos convencionales. Por ejemplo, en el caso del sistema e-flow se reportan reducciones de hasta 95 % en el uso de agua, 90 % en químicos y 40 % en energía respecto de procesos húmedos tradicionales (Periyasamy & Periyasami, 2023). Estudios comparativos muestran que los paquetes de lavado sostenible pueden ahorrar entre 3.9 y 19.4 L/kg de agua, dependiendo del grado de desteñido (claro, medio u oscuro), además de reducir el tiempo de ciclo entre 15.5 y 21.5 minutos, con menor impacto químico y energético (Rahaman et al., 2025). De forma complementaria, Hasan et al. (2024) evidencian que la combinación de lavado con ozono y desteñido láser mejora el puntaje de impacto ambiental (EIM) frente a rutas convencionales, aun cuando no siempre se reporten valores específicos de litros por kilogramo.

Una revisión sistemática centrada en el consumo de agua en el lavado de pantalones de mezclilla confirma que las tecnologías emergentes —ozono, láser, nanoburbujas y sistemas de aerosol o niebla— permiten disminuir o incluso eliminar etapas de inmersión, con ahorros de agua superiores al 75–90 % en ciertos escenarios (Hasan et al., 2024; Khan & Jintun, 2021; Uysaler et al., 2025). Nayak et al. (2022), por ejemplo, documentan que la combinación de láser digital y ozono implementada en empresas proveedoras de marcas globales puede lograr hasta 97 % de ahorro de agua, 70–90 % de ahorro de energía y 60–70 % de reducción en el uso de químicos.

En paralelo, se han propuesto alternativas de abrasión menos intensivas en recursos que el stone wash tradicional con piedra pómez. Entre ellas destacan el uso de hueso de durazno y piedras sintéticas

reutilizables (Ivedi & Cay, 2023), el empleo de extremozimas en lugar de procesos químicos agresivos (Kakkar & Wadhwa, 2022) y el desarrollo de esferas abrasivas a partir de ceniza de cascarilla de arroz, que además permiten adsorber parte del colorante durante el proceso (Arenas et al., 2017). Estas rutas se alinean con principios de economía circular, al revalorizar residuos agroindustriales y reducir la generación de lodos.

Finalmente, la biotecnología enzimática ha sido identificada como un componente clave para reducir químicos y agua en múltiples etapas del proceso textil. Madhu & Chakraborty (2017) y Shahid et al. (2016) describen la aplicación de amilasas para desengomado, celulasas para biostone y biopulido, y lacasas u otras oxidoreductasas en procesos de blanqueo más suaves, con beneficios ambientales y de calidad del acabado.

### 3. Tratamiento y circularidad del agua residual en la industria de la mezclilla

El segundo gran frente de innovación identificado en la literatura se relaciona con el tratamiento y reúso de aguas residuales generadas durante el lavado y acabado de mezclilla. La problemática no se limita al alto consumo de agua fresca, sino también a la descarga de efluentes con concentraciones elevadas de DQO, DBO, color, sólidos y otros contaminantes (Ergan et al., 2025; Souza et al., 2016).

Rendón-Castrillón et al. (2023) proponen un tren híbrido biorremediación–nanofiltración para tratar efluentes con índigo, comparando dos estrategias de bioaumentación: microorganismos nativos del efluente y lodos activados de una planta municipal. Ambas lograron reducir la DQO a cerca de 200 mg/L y eliminar más del 90 % del color, obteniendo posteriormente un permeado de alta calidad mediante nanofiltración, apto para su reutilización en el lavado de mezclilla.

Buscio et al. (2015) estudian el uso de ultrafiltración para recuperar el colorante índigo y clarificar el agua, mientras que Yigit et al. (2009) evalúan un biorreactor de membranas (MBR) a escala piloto para tratar agua residual mixta procedente de teñido, acabado y encolado en una planta textil. En conjunto, estos estudios muestran que la integración de procesos biológicos con tecnologías de membranas permite avanzar hacia esquemas de recirculación intraplanta, donde el aporte de agua fresca se limita a pérdidas y purgas.

Desde una perspectiva de gestión de recursos, Nahar et al. (2024) analizan escenarios de abastecimiento basados en el uso de 100 % de aguas residuales tratadas o mezclas con agua blanda en una planta de



mezclilla, mientras que Gusakov et al. (2000) enfatizan la importancia de caracterizar y segregar las corrientes de efluentes para identificar aquellas con mayor potencial de reúso. Asimismo, se han explorado nuevos insumos para mejorar el tratamiento de efluentes, como carbón activado a partir de bagazo de caña (da Costa et al., 2021) y coagulantes biobasados, así como estudios de toxicidad de ciertos productos utilizados en el tratamiento (Méndez-Hernández et al., 2022). Estas contribuciones apuntan a esquemas de depuración y reciclaje alineados con regulaciones ambientales más estrictas y con los objetivos de circularidad del agua en la industria textil (Catarino et al., 2025; Ergan et al., 2025; Moreira et al., 2025).

#### 4. PYMES manufactureras, barreras de adopción y transición hacia la sostenibilidad

Aunque la evidencia científica muestra que la reducción del consumo de agua en el lavado de mezclilla es técnicamente viable mediante paquetes integrados de innovación de proceso y gestión del recurso, su adopción en contextos reales, particularmente en PYMES manufactureras, enfrenta obstáculos significativos.

La revisión sistemática sobre alternativas sostenibles para el consumo de agua en el lavado de pantalones de mezclilla evidencia que, si bien se han desarrollado diversas propuestas tecnológicas, la mayoría se ha validado únicamente en condiciones piloto, grandes plantas industriales o en colaboración con marcas internacionales. Esta situación revela una brecha considerable en su implementación dentro de las pequeñas y medianas empresas manufactureras, que enfrentan limitaciones estructurales y financieras que dificultan su adopción.

Entre las principales barreras identificadas destacan los altos costos de inversión inicial en maquinaria especializada, como equipos de ozono, sistemas de láser o tecnologías de niebla, los cuales resultan prohibitivos para PYMES con márgenes operativos reducidos (Eroğlu, 2023; Hasan et al., 2024; Nayak et al., 2022). Asimismo, se requiere personal técnico capacitado para operar y mantener estas tecnologías avanzadas, lo que genera gastos adicionales en formación, asistencia técnica y mantenimiento (Catarino et al., 2025; Khan & Jintun, 2021). A ello se suma la percepción de riesgo vinculada a modificar procesos de producción tradicionales, ante el temor de que las innovaciones afecten la calidad estética del producto o reduzcan la productividad (Nadeem et al., 2024; Uysaler et al., 2025). Finalmente, se observa una débil articulación institucional entre empresas, proveedores de tecnología, organismos



gubernamentales y centros de investigación, lo que limita el acceso a financiamiento, incentivos fiscales y programas de acompañamiento técnico (Registro y Seguimiento de PI, 2025).

Por lo tanto, la literatura revisada muestra que la transición hacia la sostenibilidad en el sector denim no depende únicamente de la disponibilidad de tecnologías limpias, sino de un entramado complejo de factores económicos, organizacionales y normativos. Este marco teórico sustenta la pertinencia de analizar, mediante un estudio de caso, cómo las PYMES manufactureras de Tehuacán avanzan, o se rezagan, en la adopción de alternativas sostenibles para el uso y gestión del agua en el proceso de lavado de mezclilla.

La revisión de literatura permitió identificar un conjunto de estudios que abordan la sostenibilidad en la industria del denim desde diferentes perspectivas: tecnológica, ambiental, organizacional y de gestión de recursos. Las investigaciones revisadas aportan evidencia sobre los avances en la reducción del consumo hídrico, la implementación de tecnologías limpias y las barreras que enfrentan las PYMES para su adopción. Se resumen las principales aportaciones teóricas y empíricas de estos trabajos, destacando su contribución a la comprensión del proceso de transición hacia la sostenibilidad en el sector manufacturero textil (Tabla 1).

**Tabla 1.** Aportaciones relevantes de la literatura sobre sostenibilidad en la industria del denim

| <b>Autor(es) y año</b>                    | <b>Enfoque del estudio</b>                               | <b>Principales aportaciones</b>  | <b>Limitaciones o vacíos identificados</b>                 |
|---|--|--|--|
| <b>Ben Fraj &amp; Jaouachi (2021)</b>     | Evaluación ambiental del proceso de lavado de mezclilla. | Cuantifican el consumo de agua y energía por prenda (hasta 70 L y 1 kWh).                                    | No aborda alternativas tecnológicas de sustitución.        |
| <b>Eroğlu (2023)</b>                      | Análisis de tecnologías limpias (ozono y láser).         | Demuestra ahorros superiores al 90 % en agua y químicos, con plantas industriales; igual calidad de acabado. | Se centra en grandes fábricas; poca aplicabilidad a PYMES. |
| <b>Rahaman et al. (2025)</b>              | Comparativo entre métodos convencionales y sostenibles.  | Muestra reducciones de 3.9–19.4 L/kg en consumo de agua.   | No analiza impacto económico ni barreras de adopción.      |
| <b>Periyasamy &amp; Periyasami (2023)</b> | Revisión bibliométrica de innovación en el denim.        | Sistematizan 549 artículos sobre tecnologías sostenibles y técnica; reúso de agua.                           | Enfocado a innovación; sin dimensión organizacional.       |
| <b>Souza et al. (2016)</b>                | Impacto ambiental global de la industria del denim.      | Identifica el teñido y el lavado como etapas más contaminantes.  | No plantea soluciones o estrategias de mitigación.         |
| <b>Khan &amp; Jintun (2021)</b>           | Evaluación experimental de lavado con ozono y e-flow.    | Logra ahorro de agua de hasta 90 % y reducción de tiempo de ciclo.   | Requiere inversión inicial alta.                           |
| <b>Uysaler et al. (2025)</b>              | Sostenibilidad en PYMES textiles.                        | Evidencia resistencia al cambio tecnológico por limitaciones financieras.                                    | No incluye análisis de políticas públicas o incentivos.    |
| <b>Registro y Diagnóstico</b>             | local en   | Identifica sobreexplotación de   | Requiere seguimiento                                       |

| <b>Autor(es) y año</b>            | <b>Enfoque del estudio</b> | <b>Principales aportaciones</b>                 | <b>Limitaciones o vacíos identificados</b>           |
|-----------------------------------|----------------------------|---|--|
| <b>Seguimiento de lavanderías</b> |                            | de acuíferos y falta de plantas de tratamiento. | de longitudinal e integración con políticas locales. |
| <b>PI (2025)</b>                  | Tehuacán.                  |   |  |

El análisis comparativo presentado en la Tabla 1 evidencia que, aunque la literatura ha avanzado significativamente en la identificación de tecnologías sostenibles para el sector denim, existe una brecha entre la innovación técnica y su adopción efectiva en pequeñas y medianas empresas. Este vacío justifica la realización del presente estudio de caso en PYMES manufactureras de Tehuacán, orientado a comprender los factores organizacionales, económicos y contextuales que determinan su transición hacia modelos productivos sostenibles.

## **METODOLOGÍA**

La presente investigación adopta un enfoque cualitativo y descriptivo, orientado a analizar las prácticas, percepciones y estrategias de sostenibilidad implementadas por pequeñas y medianas empresas manufactureras del sector denim en Tehuacán, Puebla. Se utilizó el método de estudio de caso, el cual permite comprender a profundidad un fenómeno dentro de su contexto real, considerando los factores ambientales, tecnológicos, económicos y organizacionales que influyen en la transición hacia la sostenibilidad.

La unidad de análisis estuvo conformada por PYMES del sector textil-denim ubicadas en Tehuacán, seleccionadas por su relevancia económica en la región y su participación directa en los procesos de lavado y acabado de mezclilla, actividades que demandan altos volúmenes de agua y generan residuos líquidos con carga contaminante. Estas empresas representan los principales retos y oportunidades para implementar prácticas sostenibles y reducir la huella hídrica industrial.

Para la recolección de información se utilizaron tres fuentes complementarias. La primera fue de tipo documental, basada en la revisión de literatura científica y técnica relacionada con consumo de agua, tecnologías limpias, tratamiento de efluentes y normatividad ambiental. La segunda fuente fue institucional, derivada del documento “Registro y Seguimiento de PI (2025)”, que contiene un

diagnóstico regional de prácticas productivas y gestión del recurso hídrico en lavanderías. Finalmente, se realizaron entrevistas semiestructuradas a propietarios y supervisores de PYMES manufactureras, con el propósito de conocer sus percepciones respecto a la sostenibilidad, la inversión en tecnologías verdes, la capacitación del personal y el cumplimiento normativo.

La información recopilada se analizó mediante el método de análisis temático propuesto por Braun y Clarke (2019), que comprende las etapas de familiarización con los datos, codificación inicial, agrupación de categorías, identificación de patrones y triangulación de fuentes. A partir de este proceso se establecieron seis categorías centrales: consumo de agua, tecnologías sostenibles, cultura organizacional, normatividad ambiental, innovación y viabilidad económica, y responsabilidad social. Estas categorías se conformaron mediante un proceso de comparación constante entre los discursos, los documentos técnicos y las evidencias empíricas obtenidas, permitiendo identificar los ejes más representativos de la sostenibilidad industrial en el sector denim.

La validez del estudio se aseguró a través de la triangulación de fuentes documentales, institucionales y testimoniales, así como mediante la revisión por pares académicos que confirmaron la coherencia de las categorías y la pertinencia del análisis. La confiabilidad se garantizó con la aplicación de un protocolo de codificación uniforme y el registro sistemático de las decisiones interpretativas. En términos éticos, se respetó la confidencialidad de las empresas participantes, asegurando que la información se utilizara exclusivamente con fines académicos y que los datos fueran tratados conforme a los principios de integridad, consentimiento informado y anonimato.

El estudio permite comprender el comportamiento de las PYMES manufactureras del sector denim frente al desafío de adoptar prácticas sostenibles, considerando tanto los condicionantes económicos como las presiones ambientales y normativas. De este modo, la metodología aplicada facilita una lectura integral del proceso de transición hacia modelos productivos más responsables y eficientes en el uso de los recursos naturales.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados del estudio muestran una realidad multifactorial en torno a la transición hacia la sostenibilidad en las pequeñas y medianas empresas (PYMES) manufactureras del sector denim en Tehuacán, Puebla. El análisis cualitativo permitió integrar las percepciones empresariales, los hallazgos

documentales y la evidencia institucional en seis categorías de análisis que revelan las tensiones entre la producción industrial, la protección ambiental y la viabilidad económica. A partir de la codificación temática, se identificaron dimensiones ambientales, tecnológicas, organizacionales y sociales que ayudan a comprender el grado de avance y los desafíos que enfrentan las empresas en la adopción de prácticas sostenibles.

En la categoría de consumo de agua, se constató que los procesos de lavado y acabado de mezclilla continúan siendo los más demandantes del recurso hídrico. Los registros técnicos indican que para el acabado de un solo pantalón se requieren en promedio entre 60 y 80 litros de agua, lo que genera un consumo mensual de miles de metros cúbicos en una sola planta de tamaño mediano. Los empresarios entrevistados reconocieron que gran parte de las lavanderías dependen de pozos profundos o de tomas irregulares, lo que incrementa la presión sobre los acuíferos locales. A pesar de ello, se observan esfuerzos aislados para implementar medidas de ahorro, como la recirculación parcial de agua tratada y el uso de detergentes de baja espuma. Estas iniciativas, aunque limitadas, reflejan una incipiente conciencia sobre la necesidad de racionalizar el uso del recurso. No obstante, persisten carencias importantes en infraestructura hidráulica y en la disponibilidad de equipos para el tratamiento y reúso de aguas residuales.

Respecto a las tecnologías sostenibles, el estudio revela una brecha entre el conocimiento de las innovaciones disponibles y su implementación práctica. Tecnologías como el lavado con ozono, el láser y el sistema e-flow son conocidas por algunos empresarios, pero su adopción es escasa debido a los altos costos de inversión inicial. Solo una minoría de las PYMES que mantienen contratos con marcas internacionales ha logrado incorporar equipos de bajo consumo hídrico o secadores eficientes, impulsadas por los requisitos de certificación ambiental exigidos por sus clientes. En cambio, la mayoría de las lavanderías continúa utilizando métodos convencionales con piedra pómez y productos químicos abrasivos. Este patrón confirma que la sostenibilidad tecnológica sigue siendo percibida como una ventaja competitiva opcional y no como una necesidad productiva ineludible. Las empresas expresaron interés en recibir capacitación sobre tecnologías limpias y en explorar esquemas de financiamiento o arrendamiento que faciliten su implementación gradual.

En cuanto a la cultura organizacional, los resultados muestran que las prácticas sostenibles dependen en

gran medida de la visión de los propietarios o gerentes. En las empresas familiares de larga tradición, la prioridad sigue siendo mantener la productividad y cumplir con los plazos de entrega, mientras que la sostenibilidad es vista como un costo adicional. Sin embargo, en los negocios más jóvenes o dirigidos por una nueva generación de emprendedores se identificó un cambio de paradigma: se percibe la sostenibilidad como una oportunidad para mejorar la reputación empresarial, acceder a nuevos mercados y optimizar los costos a largo plazo. En este sentido, la transición hacia una cultura empresarial ambientalmente responsable avanza de manera desigual, influenciada por el liderazgo, la edad de la empresa y el acceso a información técnica. Pese a los avances, aún se carece de mecanismos internos de monitoreo ambiental o de indicadores de desempeño que permitan evaluar de forma objetiva la reducción del impacto ecológico.

La normatividad ambiental constituye otra dimensión crítica del análisis. Si bien los empresarios están al tanto de la existencia de la NOM-001-SEMARNAT-2021, la mayoría reconoce no tener una comprensión técnica plena de los parámetros que establece ni de los procesos necesarios para su cumplimiento. Algunas lavanderías operan sin sistemas formales de tratamiento de aguas residuales y descargan efluentes directamente en el drenaje municipal, lo que genera contaminación y sanciones eventuales. Las entrevistas reflejan una percepción generalizada de que la normatividad es rígida y poco adaptada a la realidad económica de las PYMES. También se identificó la ausencia de incentivos gubernamentales que faciliten el cumplimiento regulatorio, así como una escasa comunicación entre autoridades y productores. Este contexto genera un círculo vicioso donde la falta de recursos impide cumplir la ley, y la falta de cumplimiento impide acceder a apoyos institucionales. A pesar de ello, algunas empresas han comenzado a gestionar permisos y registros ambientales básicos, lo que constituye un avance hacia la formalización de la gestión ambiental local.

En la categoría de innovación y viabilidad económica, se evidenció que la sostenibilidad se percibe de manera ambivalente: por un lado, como una necesidad ética y ambiental; y por otro, como un riesgo financiero. Los entrevistados coincidieron en que los márgenes de utilidad son reducidos y que la competencia con empresas de menor costo limita la posibilidad de realizar inversiones a mediano plazo. Sin embargo, las experiencias exitosas muestran que las empresas que han implementado sistemas de ahorro de agua o energía obtienen retornos positivos, principalmente por la reducción de gastos

operativos, la fidelización de clientes y la mejora de su posicionamiento comercial. Los resultados sugieren que la sostenibilidad puede generar beneficios tangibles cuando se combina con estrategias de eficiencia energética y economía circular. La falta de información técnica sobre los costos reales de adopción tecnológica, así como la ausencia de créditos especializados, representa uno de los principales obstáculos para la expansión de prácticas sostenibles.

Finalmente, la responsabilidad social emerge como un eje transversal que articula las dimensiones anteriores. Las PYMES del sector denim reconocen su impacto sobre el entorno y muestran una preocupación creciente por las condiciones laborales, la salud ocupacional y la relación con la comunidad. Se registraron ejemplos de empresas que utilizan productos biodegradables, promueven la reforestación local o colaboran con instituciones educativas para el desarrollo de prácticas sustentables. Sin embargo, estas acciones suelen responder a iniciativas personales o a exigencias externas, más que a una política empresarial consolidada. La mayoría de las empresas carece de una estrategia formal de responsabilidad social o de programas de evaluación ambiental. Aun así, los actores locales perciben una oportunidad de articular esfuerzos entre empresarios, universidades y autoridades municipales para crear una red de producción responsable que impulse la sostenibilidad como valor compartido.

En conjunto, los resultados reflejan que la transición hacia la sostenibilidad en las PYMES manufactureras de Tehuacán se encuentra en una etapa inicial, caracterizada por avances parciales y una conciencia ambiental en proceso de maduración. Si bien se han incorporado algunas prácticas de ahorro y reciclaje, el cambio estructural requiere superar las barreras económicas y fortalecer la articulación institucional. La sostenibilidad industrial, más que un objetivo a futuro, debe concebirse como una estrategia de supervivencia y diferenciación competitiva. La adopción gradual de tecnologías limpias, la mejora de la gestión del agua y la integración de la responsabilidad social en la cultura organizacional representan los pilares fundamentales para avanzar hacia una industria del denim que combine productividad, innovación y compromiso ambiental.

La síntesis presentada resume los principales resultados obtenidos del estudio de caso (Tabla 2), organizados en torno a las seis categorías emergentes que estructuran el análisis de la sostenibilidad en las PYMES manufactureras del sector denim en Tehuacán. Esta comparación permite visualizar las interrelaciones entre los aspectos ambientales, tecnológicos, organizacionales y sociales que



condicionan el avance hacia prácticas más responsables. Los hallazgos muestran que, aunque existe una conciencia ambiental creciente y algunas iniciativas de ahorro de recursos, la sostenibilidad aún enfrenta barreras significativas relacionadas con la falta de financiamiento, la escasa capacitación técnica y la débil articulación institucional. En conjunto, la evidencia confirma que el camino hacia una industria textil sustentable requiere no solo de innovación tecnológica, sino también de una transformación cultural y de políticas públicas que acompañen a las empresas en su proceso de adaptación. De este modo, el estudio concluye que la sostenibilidad en el sector denim de Tehuacán no debe concebirse como un fin aislado, sino como una estrategia integral que combine competitividad, responsabilidad social y protección ambiental.

**Tabla 2.** Síntesis de resultados del estudio de caso

| <b>Categoría</b>               | <b>Descripción del hallazgo</b>  | <b>Evidencia destacada</b>   | <b>Conclusión parcial</b>  |
|--------------------------------|--|--|--|
| <b>Consumo de agua</b>         | Los procesos de lavado y acabado de mezclilla requieren entre 60 y 80 litros de agua por prenda. La mayoría de las PYMES carece de infraestructura para recirculación o tratamiento. | Dependencia de pozos profundos o tomas irregulares; esfuerzos incipientes de recuperación de aguas grises. | La gestión del agua representa el principal reto ambiental y económico del sector.           |
| <b>Tecnologías sostenibles</b> | Las innovaciones como ozono, láser o e-flow son conocidas, pero poco implementadas por sus costos iniciales y falta de financiamiento.   | Solo las empresas que trabajan con marcas internacionales han incorporado equipos de bajo consumo hídrico. | La adopción tecnológica es desigual; requiere incentivos financieros y capacitación técnica. |
| <b>Cultura organizacional</b>  | La sostenibilidad depende de la visión del propietario. Empresas familiares de tradicionales   | Se identifican prácticas aisladas de residuos y priorizan capacitación en temas                            | La cultura empresarial se encuentra en transición hacia modelos de responsabilidad           |

| Categoría              | Descripción del hallazgo  | Evidencia destacada  | Conclusión parcial  |
|------------------------|---|--|---|
| Normatividad ambiental | productividad; las nuevas ambientales.  |  | ambiental.  |
|                        | generaciones promueven  |  |   |
|                        | eficiencia y reputación ambiental.  |  |   |
| Normatividad ambiental | Existe conocimiento limitado de la NOM-001-SEMARNAT-2021 y dificultades para cumplirla por falta de recursos y asesoría técnica.  | Se requiere Descargas sin acompañamiento tratamiento adecuado y institucional y estímulos escasa supervisión para fortalecer el gubernamental. | Se requiere cumplimiento normativo.   |
|                        | Las PYMES asocian y sostenibilidad con inversión operativos y mejora de costos, pero reconocen imagen en empresas que beneficios económicos a aplican medidas de mediano plazo. | Reducción de costos operativos y mejora de imagen en empresas que aplican medidas de eficiencia.   | La sostenibilidad puede convertirse en una estrategia de competitividad si se gestiona con visión integral. |
|                        | Crece la conciencia sobre impactos comunitarios y laborales, aunque las acciones son esporádicas.   | Uso de productos biodegradables, reforestación y colaboración con instituciones educativas.  | Se requiere institucionalizar la responsabilidad social como parte de la gestión empresarial.               |

**Fuente:** Elaboración propia a partir del estudio de caso en PYMES manufactureras del sector denim en Tehuacán, Puebla (2025).

El análisis de los resultados evidencia que la transición hacia la sostenibilidad en las PYMES manufactureras del sector denim en Tehuacán, Puebla, se encuentra en una fase incipiente caracterizada



por avances puntuales, una creciente conciencia ambiental y una notable brecha entre la intención y la acción. Esta situación coincide con lo señalado por Rahaman et al. (2025) y Eroğlu (2023), quienes advierten que, a pesar de los avances tecnológicos en procesos de lavado sustentable, la adopción real en pequeñas y medianas empresas sigue siendo limitada por la falta de recursos financieros y la ausencia de mecanismos institucionales de apoyo.

Los resultados también corroboran las observaciones de Periyasamy & Periyasami (2023), quienes subrayan que la innovación tecnológica por sí sola no garantiza la sostenibilidad si no se acompaña de una transformación organizacional y de una cultura ambiental consolidada. En este estudio, la cultura empresarial emergió como un factor determinante: mientras algunas PYMES muestran resistencia al cambio, otras comienzan a incorporar principios de eficiencia energética, reciclaje y responsabilidad social, lo que sugiere el surgimiento de un nuevo paradigma empresarial orientado a la sostenibilidad.

En el plano ambiental, los datos confirman la persistencia de un modelo productivo altamente dependiente del agua, lo que coincide con los reportes de Ben Fraj & Jaouachi (2021) y Souza et al. (2016), quienes identifican al lavado y al acabado como las etapas de mayor impacto hídrico y contaminación en la industria textil. Aunque las PYMES locales manifiestan interés en reducir su consumo, la falta de infraestructura para el tratamiento y recirculación de aguas residuales limita sus acciones. Esto refleja una problemática estructural en la gestión del agua industrial en México, donde las regulaciones como la NOM-001-SEMARNAT-2021 existen, pero su aplicación se ve obstaculizada por la limitada capacidad técnica de las empresas, tal como también se documentó en el diagnóstico institucional incluido en el análisis.

En términos económicos, los hallazgos del estudio demuestran que la sostenibilidad es percibida simultáneamente como una carga y una oportunidad. Las empresas que han incorporado medidas de ahorro de agua o energía reportan beneficios a mediano plazo, lo que valida las conclusiones de Nadeem et al. (2024), quienes argumentan que las estrategias de eficiencia pueden traducirse en ventajas competitivas si se articulan con políticas de mercado y financiamiento verde. Sin embargo, la mayoría de las PYMES carece de acceso a créditos y programas de apoyo, lo que obstaculiza la modernización de sus procesos productivos.

Asimismo, la investigación pone de manifiesto que la sostenibilidad requiere un enfoque sistémico que

integre los planos tecnológico, económico y social. La literatura internacional enfatiza el papel de la cooperación interinstitucional, las alianzas público-privadas y la formación técnica como pilares para la transformación industrial (Catarino et al., 2025; Hasan et al., 2024). Los resultados locales reafirman esta necesidad: sin la participación coordinada de empresas, gobierno y academia, los esfuerzos individuales resultan insuficientes para generar un cambio estructural.

En síntesis, la discusión revela que el avance hacia la sostenibilidad en el sector denim de Tehuacán depende de la capacidad de las PYMES para adoptar una visión estratégica que concilie la rentabilidad con la protección ambiental. Este proceso implica superar barreras históricas y fortalecer la gestión del conocimiento, la innovación tecnológica y la responsabilidad social como ejes de competitividad regional.

## **CONCLUSIONES**

El estudio permitió comprender los desafíos y avances que enfrentan las PYMES manufactureras del sector denim en Tehuacán, Puebla, en su transición hacia la sostenibilidad. Los resultados muestran que, aunque existe una creciente sensibilización sobre la problemática ambiental y un reconocimiento de la necesidad de cambio, persisten limitaciones significativas que dificultan la adopción plena de prácticas sostenibles.

En primer lugar, se confirma que el consumo de agua continúa siendo el principal problema ambiental del sector. Las empresas aún dependen de tecnologías convencionales y carecen de sistemas eficientes de recirculación y tratamiento, lo que genera un impacto negativo en los acuíferos locales. En segundo lugar, la adopción de tecnologías sostenibles como el ozono, el láser y el e-flow se encuentra restringida por los altos costos de inversión, la escasez de financiamiento y la falta de capacitación técnica.

En el plano organizacional, la cultura empresarial representa un punto crítico. La sostenibilidad aún no se asume como un eje estratégico de gestión, aunque se observan avances en empresas lideradas por nuevas generaciones con mayor apertura a la innovación. Asimismo, el cumplimiento normativo se ve obstaculizado por la complejidad de las regulaciones y la falta de acompañamiento institucional, lo que exige diseñar programas de asesoría y estímulo para facilitar la adaptación de las PYMES.

Desde la perspectiva económica, los hallazgos evidencian que la sostenibilidad puede convertirse en una fuente de competitividad si se integra a la gestión productiva mediante modelos de eficiencia energética,

reducción de residuos y economía circular. Finalmente, la responsabilidad social se posiciona como una dimensión emergente, aún en desarrollo, que puede consolidarse a través de alianzas con comunidades locales e instituciones educativas.

En conjunto, los resultados permiten concluir que la sostenibilidad en el sector denim de Tehuacán debe entenderse como un proceso evolutivo que requiere una estrategia integral basada en tres pilares:

Innovación tecnológica accesible que promueva la reducción del consumo de recursos y la mejora de procesos.

Fortalecimiento institucional mediante políticas públicas, financiamiento verde y acompañamiento técnico a las PYMES.

Transformación cultural orientada a la responsabilidad social y ambiental como parte esencial de la gestión empresarial.

El estudio contribuye a la comprensión del fenómeno desde una perspectiva local y aporta una base empírica para el diseño de políticas y programas que impulsen la sostenibilidad industrial en regiones con alta concentración textil. En futuras investigaciones se sugiere profundizar en el análisis de la cadena de valor del denim, incorporando indicadores cuantitativos de desempeño ambiental y estudios comparativos con otras zonas productivas del país, con el fin de fortalecer la visión sistémica del desarrollo sostenible en la industria manufacturera mexicana.

A partir de los hallazgos obtenidos en este estudio se identifican diversas líneas de investigación que pueden fortalecer el conocimiento sobre la sostenibilidad en el sector textil y particularmente en las PYMES manufactureras del denim en regiones industriales como Tehuacán. En primer lugar, es necesario avanzar hacia una evaluación cuantitativa del desempeño ambiental que permita medir indicadores específicos de huella hídrica, consumo energético y emisiones de carbono en lavanderías y talleres textiles, con el fin de establecer parámetros de eficiencia comparables a nivel nacional. En segundo término, se propone el desarrollo de modelos de economía circular aplicados a la industria textil, orientados al reciclaje y reúso de agua, residuos y subproductos, promoviendo sistemas cerrados de producción. Otra línea prioritaria se centra en la innovación tecnológica accesible para PYMES, investigando el diseño y transferencia de tecnologías limpias de bajo costo que sean económicamente viables para las empresas locales. También se plantea la necesidad de estudiar mecanismos para

fortalecer la gestión del conocimiento y la capacitación técnica de los trabajadores, mediante programas especializados en sostenibilidad, eficiencia energética y responsabilidad social. Además, se recomienda analizar el impacto de las políticas públicas y de los instrumentos de financiamiento verde en la adopción de prácticas sostenibles, así como realizar estudios comparativos regionales que contrasten el avance de Tehuacán con otros polos textiles del país para identificar modelos replicables. Finalmente, se sugiere incorporar una perspectiva social y comunitaria de la sostenibilidad que examine los efectos de la actividad industrial en la salud, el empleo y la calidad de vida de las comunidades, fortaleciendo el enfoque de justicia ambiental y el desarrollo territorial sostenible.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arenas, C. N., Vasco, A., Betancur, M., & Martínez, J. D. (2017). Removal of indigo carmine (IC) from aqueous solution by adsorption through abrasive spherical materials made of rice husk ash (RHA). *Process Safety and Environmental Protection*, 106, 224–238. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.01.013>
- Ben Fraj, A., & Jaouachi, B. (2021). Effects of ozone treatment on denim garment properties. *Coloration Technology*, 137(6), 678–688. <https://doi.org/10.1111/cote.12568>
- Buscio, V., Crespi, M., & Gutiérrez-Bouzán, C. (2015). Sustainable dyeing of denim using indigo dye recovered with polyvinylidene difluoride ultrafiltration membranes. *Journal of Cleaner Production*, 91, 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.016>
- Catarino, M. L., Sampaio, F., & Gonçalves, A. L. (2025). Sustainable Wet Processing Technologies for the Textile Industry: A Comprehensive Review. *Sustainability (Switzerland)*, 17(7). <https://doi.org/10.3390/su17073041>
- da Costa, W. K. O. C., Gavazza, S., Duarte, M. M. M. B., Freitas, S. K. B., de Paula, N. T. G., & Paim, A. P. S. (2021). Preparation of Activated Carbon from Sugarcane Bagasse and Removal of Color and Organic Matter from Real Textile Wastewater. *Water, Air, and Soil Pollution*, 232(9). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05306-w>
- Ergan, B. T., Yucel, O., Gengec, E., & Aydin, E. S. (2025). Integrating machine learning regression and classification for enhanced interpretability in optimizing the Fenton process for real wastewater



- treatment conditions. *Separation and Purification Technology*, 363. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132182>
- Eroğlu, N. S. (2023). SUSTAINABILITY APPROACHES IN DENIM PRODUCTS AND PRODUCTION PROCESSES. *Tekstil ve Muhendis*, 30(132), 335–350. <https://doi.org/10.7216/teksmuh.1268723>
- González-López, F., Alonso-Molina, J. L., Mendoza-Roca, J. A., Cuartas-Urbe, B., Rendón-Castrillón, L., Ocampo-López, C., & Ramírez-Carmona, M. (2024). Native microorganisms for sustainable dye biodegradation in wastewaters from jeans finishing. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(56), 64675–64687. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35563-1>
- Gusakov, A. V., Sinitsyn, A. P., Berlin, A. G., Markov, A. V., & Ankudimova, N. V. (2000). Surface hydrophobic amino acid residues in cellulase molecules as a structural factor responsible for their high denim-washing performance. *Enzyme and Microbial Technology*, 27(9), 664–671. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(00\)00264-7](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(00)00264-7)
- Hasan, S. M. M., Nahid-Ull-islam, M., Chowdhury, M. K. H., Akter, M., & Sakib, M. S. I. (2024). Core 2.0 Nebulization Technique-A Sustainable Denim Finishing Approach. *Textile and Leather Review*, 7, 582–596. <https://doi.org/10.31881/TLR.2024.053>
- Ivedi, I., & Cay, A. (2023). Use of natural and synthetic materials in denim washing process as an alternative to pumice stone. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 33(1), 68–76. <https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.1076730>
- Kakkar, P., & Wadhwa, N. (2022). Extremozymes used in textile industry. *Journal of the Textile Institute*, 113(9), 2007–2015. <https://doi.org/10.1080/00405000.2021.1948251>
- Khan, Md. K. R., & Jintun, S. (2021). Sustainability Issues of Various Denim Washing Methods. *Textile and Leather Review*, 4(2), 96–110. <https://doi.org/10.31881/TLR.2021.01>
- Madhu, A., & Chakraborty, J. N. (2017). Developments in application of enzymes for textile processing. *Journal of Cleaner Production*, 145, 114–133. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.013>
- Méndez-Hernández, J. E., Ramírez-Vives, F., Sobrino-Figueroa, A. S., Garza-López, P. M., & Loera, O. (2022). Ecotoxicological Evaluation and Treatment of a Denim-Laundry Wastewater. *Water, Air, and Soil Pollution*, 233(1). <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05500-4>



- Moreira, C. A., Scanferla, C. E., Oliveira, A. G., Duarte, V. A., Arroyo, P. A., de Lara Andrade, J., Bittencourt, P. R. S., Garcia, J. C., & de Oliveira, D. M. F. (2025). Bio-adsorbents based on mesoporous silica produced from rice husks with tunable architecture and surface area for remediation of industrial effluents. *Journal of Porous Materials*, 32(1), 27–46. <https://doi.org/10.1007/s10934-024-01673-x>
- Nadeem, N., Zubair, U., Javid, A., Raza, H. S., Hussain, T., & Nawab, Y. (2024). Optimization of closed loop wet ozone process for controlled bleaching of Indigo coloured apparels through central composite design. *Process Safety and Environmental Protection*, 187, 749 – 761. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.04.108>
- Nahar, N., Haque, M. S., & Haque, S. E. (2024). Groundwater conservation, and recycling and reuse of textile wastewater in a denim industry of Bangladesh. *Water Resources and Industry*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2024.100249>
- Nayak, R., George, M., Jajpura, L., Khandual, A., & Panwar, T. (2022). Laser and ozone applications for circularity journey in denim manufacturing - A developing country perspective. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100680>
- Periyasamy, A. P., & Periyasami, S. (2023). Critical Review on Sustainability in Denim: A Step toward Sustainable Production and Consumption of Denim. *ACS Omega*, 8(5), 4472–4490. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06374>
- Rahaman, M., Hasan, M. K., & Khan, M. S. H. (2025). Environmental impact measurement and chromatic performance evaluation of denim washing: a comparison to conventional and sustainable approaches for cleaner production. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(10), 6110–6129. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36099-8>
- Registro y Seguimiento de PI. (2025). *Diagnóstico ambiental y gestión del recurso hídrico en lavanderías industriales de Tehuacán*. Documento técnico interno.
- Rendón-Castrillón, L., Ramírez Carmona, M., Ocampo-López, C., González-López, F., Cuartas-Uribe, B., & Mendoza-Roca, J. A. (2023). Treatment of water from the textile industry contaminated with indigo dye: A hybrid approach combining bioremediation and nanofiltration for sustainable



- reuse. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100498>
- Rodríguez, F. A., Mateo, M. N., Aceves, J. M., Rivero, E. P., & González, I. (2013). Electrochemical oxidation of bio-refractory dye in a simulated textile industry effluent using DSA electrodes in a filter-press type FM01-LC reactor. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 34(5), 573–583. <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.706645>
- Shahid, M., Mohammad, F., Chen, G., Tang, R.-C., & Xing, T. (2016). Enzymatic processing of natural fibres: White biotechnology for sustainable development. *Green Chemistry*, 18(8), 2256–2281. <https://doi.org/10.1039/c6gc00201c>
- Souza, R. P., Freitas, T. K. F. S., Domingues, F. S., Pezoti, O., Ambrosio, E., Ferrari-Lima, A. M., & Garcia, J. C. (2016). Photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub>, ZnO and Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> applied to degradation of textile wastewater. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 329, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2016.06.013>
- United Nations. (2015). *THE 17 GOALS | Sustainable Development*. <https://sdgs.un.org/goals>
- Uysaler, T., Altay, P., & Özcan, G. (2025). More sustainable denim fading process of two different indigo dyed denim fabrics with laser treatment. *International Journal of Clothing Science and Technology*. <https://doi.org/10.1108/IJCST-05-2024-0117>
- Vos, R. O. (2019). The spatially explicit water footprint of blue jeans: Spatial methods in action for sustainable consumer products and corporate management of water. *Case Studies in the Environment*, 3(1). <https://doi.org/10.1525/cse.2019.002006>
- Wahab, A., & Hussain, T. (2020). Eco-Friendly garment processing using aerosol technology. *Water Resources and Industry*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2020.100127>
- Yigit, N. O., Uzal, N., Koseoglu, H., Harman, I., Yukseler, H., Yetis, U., Civelekoglu, G., & Kitis, M. (2009). Treatment of a denim producing textile industry wastewater using pilot-scale membrane bioreactor. *Desalination*, 240(1–3), 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.11.071>

