

Environmental improvements and sustainability analysis in the Peruvian textile industry: Comparative assessment of finished fabric production using ISO 14040 and SimaPro

Alejandro Aldo Hurtado Arriola Espejo¹, Carol García Arias¹, Gisela Rita Gayoso Crisoles¹, Paul Jhershon Luque Valero¹, Lorena Justiniano Céspedes¹, Reinier Jiménez Borges², Yoisdel Castillo Alvarez^{*1},

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú.

²Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería,
Universidad Carlos Rafael Rodríguez de Cienfuegos, Cienfuegos.

^{*}pcigycas@upc.edu.pe

Abstract

The Life Cycle Assessment (LCA) methodology is a scientific tool that allows for the improvement of production processes, including those in the textile industry, with the aim of identifying opportunities to reduce the environmental impacts associated with this industry. The entire process was modeled using Sima Pro and primary data from the Peruvian textile company, covering everything from the receipt of the yarn to the final finish, with the functional unit being the production of 1 kg of finished fabric. The results identify the acquisition and use of cotton yarn as the main environmental determinant, responsible for approximately 73% of the global warming potential (14.35 kg CO₂ eq/kg) and more than 70% of the impact on human toxicity and land use. Dyeing represents the second source of impact, mainly in water consumption and effluent generation. The comparative analysis between conventional and organic cotton shows that the transition to organic raw materials reduces global warming by 29.6%, human carcinogenic toxicity by 37% and water consumption by more than 50%. However, organic cotton requires 7% more land and generates a 15% increase in freshwater eutrophication, highlighting environmental trade-offs linked to lower yields and higher demand for organic fertilizers. Simulation of a scenario with photovoltaic energy integration showed that an additional 32% reduction in greenhouse gas emissions can be achieved compared to the conventional system. Economically, the cost of spinning organic cotton is 21% higher, representing a challenge in terms of competitiveness. This study demonstrates that the application of LCA is essential for identifying critical points, guiding innovation, and moving toward a more sustainable Peruvian textile industry capable of reducing its environmental footprint and responding to international sustainability demands.

Keywords—Life Cycle Assessment, cotton yarn, sustainability, environmental impact, SimaPro, organic cotton.

Mejoras ambientales y análisis de sostenibilidad en la industria textil peruana: Evaluación comparativa en la producción de telas acabadas mediante ISO 14040 y SimaPro

Alejandro Aldo Hurtado Arriola Espejo¹, Carol García Arias¹, Gisela Rita Gayoso Crisoles¹, Paul Jhershon Luque Valero¹, Lorena Justiniano Céspedes¹, Reinier Jiménez Borges², Yoisdel Castillo Alvarez^{*1},

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú.

²Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería,
Universidad Carlos Rafael Rodríguez de Cienfuegos, Cienfuegos.

^{*}pcigycas@upc.edu.pe

Resumen—La metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta científica que permite mejorar los procesos productivos entre ellos el textil, con el objetivo de identificar oportunidades para reducir los impactos ambientales asociados a esta industria. Se modeló el proceso completo utilizando Sima Pro y datos primarios de la empresa textil peruana, cubriendo desde la recepción del hilo hasta el acabado final, siendo la unidad funcional producir un 1 kg de tela acabada. Los resultados identifican la etapa de adquisición y uso de hilo de algodón como el principal determinante ambiental, responsable de aproximadamente el 73 % del potencial de calentamiento global (14,35 kg CO₂-eq/kg) y más del 70 % del impacto en toxicidad humana y uso de suelos. La tintorería representa la segunda fuente de impacto, principalmente en consumo de agua y generación de effuentes. El análisis comparativo entre algodón convencional y orgánico muestra que la transición hacia materia prima orgánica permite reducir el calentamiento global en 29,6 %, la toxicidad humana cancerígena en 37 % y el consumo de agua en más del 50 %. Sin embargo, el algodón orgánico requiere un 7 % más de superficie y genera un aumento del 15 % en la eutrofización de agua dulce, evidenciando trade-offs ambientales vinculados a menores rendimientos y mayor demanda de fertilizantes orgánicos. La simulación de un escenario con integración de energía fotovoltaica demostró que puede lograrse una reducción adicional del 32 % en emisiones de gases de efecto invernadero respecto al sistema convencional. Económicamente, el costo de hilado del algodón orgánico es un 21 % mayor, representando un desafío en términos de competitividad. Este estudio demuestra que la aplicación de ACV es fundamental para identificar los puntos críticos, orientar la innovación y avanzar hacia una industria textil peruana más sostenible, capaz de reducir su huella ambiental y responder a las demandas internacionales de sostenibilidad.

Keywords—Análisis de Ciclo de Vida, hilos de algodón, sostenibilidad, impacto ambiental, SimaPro, algodón orgánico.

I. INTRODUCCION

La industria textil es la tercera industria más contaminante luego de la industria de combustibles fósiles (40.5 gigatoneladas de CO₂eq) y la agricultura (9.3 gigatoneladas de CO₂eq). Esta actividad contribuye al 10 % de nuestra huella

de carbono, que es más de la generación combinada de todos los vuelos y la pesca marina. Asimismo, consume el agua para satisfacer la sed de 5 millones de personas cada año [1]. La Fundación Ellen MacArthur señala que a nivel mundial se produce 1 camión de desechos de ropa cada segundo. La cantidad de residuos anuales asciende a más de 82 mil millones de toneladas, suficientes para llenar el puerto de Sydney [2]. Por lo que se presta mucha atención a los impactos ambientales que genera. En los últimos años los usuarios están más interesados en saber de dónde proviene su prenda y que impactos genera, buscando cada vez, aquellos productos más amigables con el ambiente. En 2020, el consumo textil del habitante promedio de la Unión Europea requirió 400 m² de suelo, 9 m³, 31 kg de materias primas y causó una huella de carbono de 270 kg de CO₂eq [3]. El impacto ambiental de la industria también trasciende al componente agua. Por ejemplo, la huella hídrica del sector textil en China creció entre 2001 a 2014 de 10,325.78 Mt/a a 12,623.19 Mt/a [4]. La industria textil es actualmente uno de los motores de la economía global, con una facturación anual que supera los 3 billones de dólares y emplea a más de 70 millones de personas en todo el mundo [1], [2]. Sin embargo, detrás de su dinamismo económico se esconde una de las cadenas de valor más complejas y ambientalmente intensivas del planeta. El sector es responsable de entre el 4 % y el 8 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, generando cada año cerca de 1.2 billones de toneladas de CO₂-eq y consumiendo aproximadamente 93,000 millones de metros cúbicos de agua para la producción textil [3], [4], [5]. Solo en Europa, se estima que el consumo textil representa entre el 2 % y el 10 % de todos los impactos ambientales asociados al ciclo de vida de productos [6]. El modelo lineal tradicional de “extraer, fabricar, desperdiciar” ha resultado en la acumulación anual de más de 92 millones de toneladas de residuos textiles, de los cuales solo una fracción mínima es reciclada o reutilizada [7], [8]. El resto termina en vertederos o es incinerado, perpetuando la

pérdida de recursos y exacerbando la contaminación ambiental, especialmente en regiones en vías de desarrollo [9], [10]. Además, los impactos negativos del sector se extienden al uso intensivo de productos químicos —incluyendo tintes, acabados y agentes de tratamiento, la contaminación de cuerpos de agua, la degradación de suelos agrícolas y la emisión de microplásticos al medio ambiente [11], [12], [13].

Estudios recientes subrayan que el algodón, aunque es la fibra natural más demandada, implica elevados consumos de agua, fertilizantes y pesticidas, contribuyendo a la salinización y degradación de suelos en países productores [14], [15]. Las fibras sintéticas, como el poliéster, si bien requieren menos agua y tierra, presentan una mayor huella de carbono y un alto consumo energético derivado de fuentes fósiles [16], [17]. El reto se acentúa en la gestión de mezclas de fibras y residuos textiles posconsumo, que dificultan las estrategias de reciclaje eficiente y la adopción de modelos de economía circular [18]. La transición hacia una industria textil más circular y baja en carbono requiere de estrategias basadas en la innovación, la optimización de procesos, el uso de fibras recicladas, la incorporación de energías renovables, el ecodiseño y la gestión integral de la cadena de suministro [2], [12].

En este contexto, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), bajo los lineamientos de la norma internacional ISO 14040, se ha consolidado como la metodología más robusta para la evaluación ambiental integral de productos y procesos textiles [15], [17]. El ACV permite identificar los principales “hotspots” de impacto, comparar alternativas tecnológicas, y fundamentar decisiones estratégicas en toda la cadena de valor, desde la extracción de materia prima hasta la disposición final [5], [6], [11]. La empresa Industrias Nettalco S.A. (en adelante Industrias Nettalco) es una empresa textil peruana exportadora de prendas de vestir en tejido de punto en algodón. Se encuentra posicionada en el mercado desde hace más de 50 años y cuenta con una cartera de clientes en USA, América Latina y Europa en la cual para el 2023, las operaciones emitieron 8815.37 toneladas de CO₂eq y consumieron 432 921 m³ de agua.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Caracterización del proceso productivo

El proceso de producción se agrupa en dos etapas: textil y confección. En la Fig.1 se muestra el diagrama de proceso total de producción que involucra las etapas señaladas. La etapa textil corresponde a la fabricación de tela acabada y consta de los procesos de tejeduría y tintorería. El proceso inicia con el abastecimiento de hilado. Se precisa que Industrias Nettalco no tiene una propia hilandería, sino que se compra la materia prima a proveedores locales. Una vez que se aprueba los controles respectivos el hilado ingresa a tejeduría para convertir el hilo en tejido de punto crudo. Luego del proceso de tejeduría, continua el proceso de tintorería, en donde se transforma la tela cruda en tela acabada y se generan cuatro tipos de telas: estampado, melange, rayado y color entero; las cuales son enviadas al almacén de “tela acabada”. La etapa de

confección corresponde a la fabricación de prendas. Consta de los procesos de corte, confección, acabados, auditoría y su empaque y despacho. El primer proceso comprende la planta de corte en donde la “tela acabada” es procesada mediante máquinas de corte, que dependiendo del estilo de la prenda podría pasar por estampado y/o bordado. Una vez completado todos los componentes de la prenda, el siguiente proceso de confección une todas las piezas hasta obtener las prendas requeridas en función al estilo. Luego continúa el proceso de acabados en el cual se planchan las prendas, se colocan las etiquetas de marca, precio, etcétera; y se procede a empacar. Finalmente, el proceso de auditoria verifica que el lote de producción cumpla con las especificaciones del cliente para ser enviado a almacén.

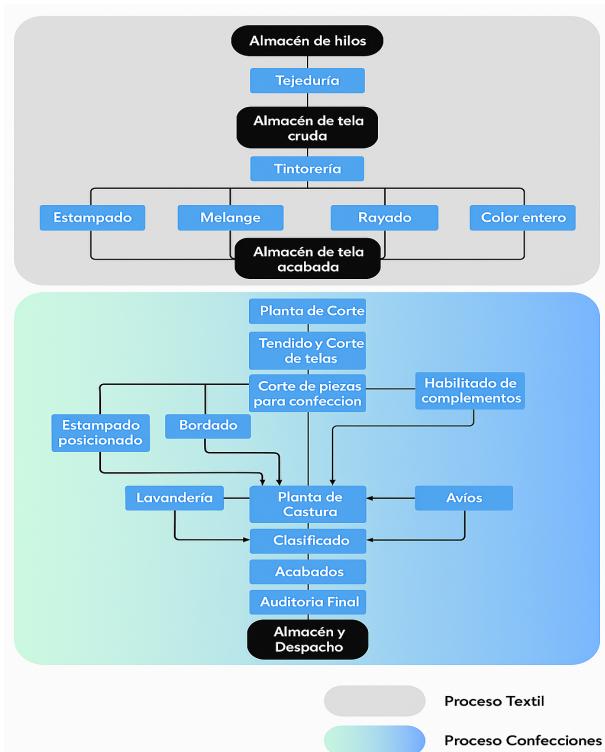


Fig. 1: Diagrama de proceso total (Textil+Confecciones).

B. Metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

La metodología científica estandarizada que permite evaluar de forma integral los impactos ambientales asociados a productos, procesos o sistemas a lo largo de todas las etapas de su ciclo de vida. Su aplicación en la industria textil resulta fundamental para identificar los principales “hotspots” ambientales y proponer estrategias de mitigación, especialmente en un sector caracterizado por el uso intensivo de recursos y la generación de residuos y emisiones [1], [2].

El ACV se basa en los lineamientos establecidos por las normas internacionales ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, que definen el marco metodológico, los principios y las directrices para su implementación rigurosa y comparable a nivel global

[14], [15]. Esta metodología abarca desde la extracción de materias primas y la manufactura, hasta el uso, transporte, distribución y disposición final del producto, siguiendo un enfoque conocido como “de la cuna a la tumba” [16].

La estructura del ACV contempla cuatro fases principales: (i) definición del objetivo y alcance, (ii) análisis del inventario del ciclo de vida (ICV), (iii) evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV), y (iv) interpretación de resultados.

En el presente estudio, se adopta este enfoque sistemático para evaluar los impactos ambientales asociados a la producción de tela acabada en la empresa Industrias Nettalco, empleando herramientas de modelado especializadas y bases de datos reconocidas internacionalmente para garantizar la validez y confiabilidad de los resultados en la (Fig.2) se expone la metodología científica estandarizada utilizada para evaluar los impactos ambientales de productos, procesos o sistemas a lo largo de su ciclo de vida.

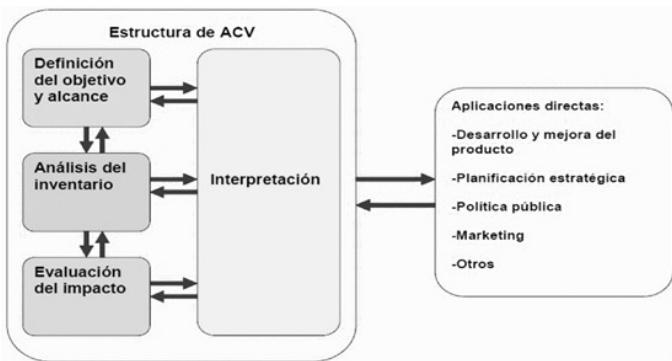


Fig. 2: Estructura de la Metodología ACV.

Definición del Objeto y Alcance

En esta fase, se establece el propósito del estudio y el sistema bajo análisis, determinando los límites del sistema y la unidad funcional, que es el parámetro de referencia que permite la comparación de resultados entre distintos estudios [17]. Los límites del sistema pueden definirse bajo distintos enfoques, como “de la cuna a la tumba.” “de la cuna a la puerta”, dependiendo del alcance del estudio [18]. Es esencial definir el objetivo del ACV, el cual puede estar orientado a la mejora de procesos, comparación de tecnologías o toma de decisiones estratégicas. La correcta formulación del objetivo y alcance garantiza la coherencia y aplicabilidad de los resultados [19].

Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

El análisis del inventario implica la recopilación y cuantificación de datos sobre flujos de entrada (materias primas, consumo energético, agua) y flujos de salida (emisiones, residuos, productos intermedios). Este proceso es clave para identificar las contribuciones ambientales de cada fase del ciclo de vida y suele ser la etapa más demandante en términos de recolección de datos [20].

En esta etapa, se generan balances de masa y energía que permiten evaluar los impactos de los insumos y emisiones en cada etapa del proceso [21]. La calidad de los datos utilizados en el inventario es determinante para la precisión del ACV, por lo que se recomienda el uso de bases de datos reconocidas, como Ecoinvent, ILCD o Gabi [22].

Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)

La evaluación del impacto ambiental se basa en la clasificación de los flujos de inventario en categorías de impacto, tales como cambio climático, eutrofización, acidificación, toxicidad humana, entre otros [23]. Posteriormente, se aplica un proceso de caracterización en el cual los datos de emisiones se convierten en indicadores de impacto a través de modelos específicos, como Ecoindicator 99 o ReCiPe [24]. Además, se pueden aplicar métodos de normalización y ponderación para facilitar la interpretación de los resultados y la toma de decisiones [25]. La normalización permite comparar los impactos de cada categoría con una referencia global o regional, mientras que la ponderación asigna valores relativos a cada impacto según su relevancia ambiental [21].

Interpretación de Resultados

En esta etapa, se analizan los resultados obtenidos en el ICV y la EICV, con el objetivo de identificar los puntos críticos del sistema y proponer estrategias de mejoras [26]. Se pueden realizar análisis de sensibilidad y de incertidumbre para evaluar la robustez de los resultados [27]. La interpretación de resultados debe garantizar la transparencia y validez del estudio, cumpliendo con los principios de exhaustividad y coherencia metodológica [28]. Además, la correcta comunicación de los hallazgos permite la toma de decisiones informadas y la formulación de estrategias de reducción de impacto ambiental [29].

III. RESULTADOS

La evaluación cuantitativa de los impactos ambientales generados por la industria textil es esencial en la búsqueda de modelos de producción responsables y alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

III-A. Caracterización del proceso productivo

Las fronteras del sistema comprenden desde el hilo que ingresa a planta de Industrias Nettalco. El diagrama de flujo representado en la figura 2 detalla el proceso de producción de tela acabada, el cual representa de forma sistemática y cuantificada las entradas (materias primas, energía, agua, insumos químicos) y las salidas (productos, subproductos, emisiones y residuos) en cada una de las etapas del proceso textil, desde la tejeduría hasta el acabado final. Se identifican también las principales etapas operativas tejeduría, tintorería, cortado y secado, y acabado lo que permite delimitar los límites del sistema bajo un enfoque “gate to gate”(de puerta a puerta), facilitando la cuantificación de consumos específicos de agua, electricidad, gas natural, insumos químicos y vapor, así como

la generación de mermas textiles, efluentes líquidos y emisiones atmosféricas indirectas. Además, este desglose permite detectar puntos críticos de impacto ambiental, optimizar el uso de recursos y fundamentar la toma de decisiones sostenibles dentro del proceso textil. En las empresas textiles una de las etapas más críticas de la producción es la obtención de tela acabada, vinculada a la alta demanda recurso naturales, lo cual está estrechamente relacionado con su potencial de contribuir significativamente a los problemas globales como el cambio climático y la escasez hídrica. Se aplica la metodología ReCiPe 2016 Midpoint (H), para cuantificar de manera precisa los impactos ambientales asociados a la fabricación de 1 kg de tela acabada. Este enfoque integral permite identificar no solo los puntos críticos a lo largo del proceso productivo, sino también visibilizar las oportunidades de mejora y reducción de impactos, elementos cada vez más demandados por el mercado internacional y la regulación ambiental emergente.

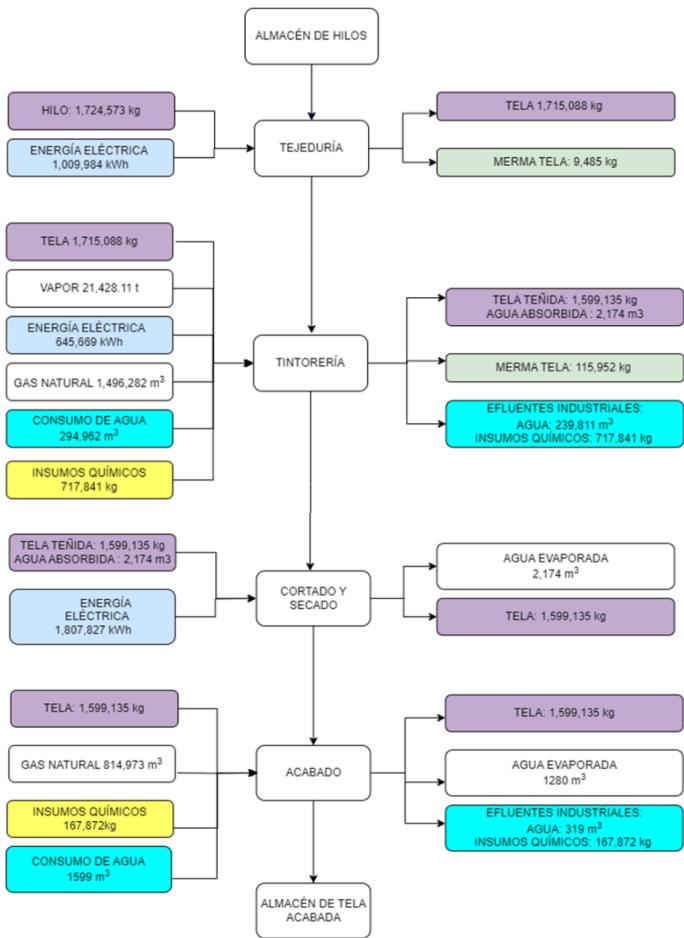


Fig. 3: Diagrama de flujo de producción de tela acabada. La evaluación de los resultados ofrece una visión estratégica sobre la huella ambiental de la producción textil, evidenciando no solo la magnitud del calentamiento global asociado, sino también el rol preponderante de la materia prima agrícola —especialmente el cultivo de algodón— en el balance global de impactos. Esta información resulta clave para orientar la innovación, la inversión y la toma de decisiones hacia procesos y materias primas más sostenibles, fortaleciendo la

competitividad y la responsabilidad ambiental de la industria textil peruana.

III-B. Metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

La unidad funcional de 1 kg de tela acabada representa la cantidad estándar de producto final sobre la cual se realiza el análisis ambiental y productivo, permitiendo así evaluar de manera precisa y comparable el impacto asociado a su fabricación. Esta unidad considera todo el proceso desde la entrada del hilo hasta el acabado final, incluyendo etapas clave como tejeduría, tintorería, corte, secado y acabado, que conforman la cadena productiva principal de la tela.

III-B1. Sistema de productos: El sistema de productos abarcará la producción de telas acabadas desde el ingreso del hilo a tejeduría, la conversión en tela cruda y su paso a tintorería, cortado y secado y finalmente al proceso de acabado para convertirse en los cuatro tipos diferentes de tela que fabrica la empresa: color entero, rayado, melange y estampado.

El límite del sistema sería puerta a puerta de la etapa textil, que incluye los procesos desde tejeduría, tintorería, cortado y secado y finalmente el acabado que va al almacén de tela acabada.

III-B2. Fronteras del sistema: Las fronteras del sistema comprenden desde que el hilo ingresa a planta hasta la obtención de tela acabada. Todas las etapas incluidas en la frontera del sistema se desarrollan en la planta ubicada en el distrito de Ate.

Para el estudio se considera la información correspondiente al año 2023, desde el 01 de enero del 2023 al 31 de diciembre del 2023.

III-B3. Nivel de detalle: La información para desarrollar el ACV es la siguiente:

- Producción
- Consumo de energía
- Consumo de combustible
- Consumo de agua
- Materia prima
- Generación de efluentes
- Generación de residuos sólidos
- Registro de extinguidores
- Registro de refrigerantes

III-B4. Criterios de exclusión:

- Se han considerado los insumos más relevantes según su volumen y demanda, debido a la dificultad de generación de información para todos los insumos.
- El estudio no ha considerado la infraestructura de las sedes de la empresa Industrias Nettalco, solo se ha tomado en cuenta los elementos consumibles para brindar el servicio dentro de las instalaciones.
- No se considera el transporte de materia prima e insumos a las instalaciones de Industrias Nettalco (de la cuna a la puerta).

- No se consideran las etapas después de la confección hasta la distribución de los productos (de la puerta a la puerta).
- No se consideran las etapas después de la distribución hasta su disposición final de los productos (de la puerta a la tumba).
- No se considera el agua virtual de la materia prima (datos no disponibles) y el gasto de agua por parte del consumidor final de las prendas.
- Para efectos del presente estudio y base de datos de Simapro, se han considerado 7 productos químicos para la etapa de tintorería y acabado: Cloruro de sodio, Carbonato de Sodio, Soda Cáustica, Agua Oxigenada al 50 %, Resina de Úrea-formaldehído, Silicona y Úrea.

III-B5. Métodos de asignación: La fabricación de tela acabada consta de los procesos de tejeduría, tintorería, corte-secado y acabado. Por lo tanto, el presente estudio corresponde a un proceso con salidas múltiples. Asimismo, a cada uno de los cuatro procesos se les asignará sus impactos respectivos.

III-B6. Impactos ambientales: Los impactos ambientales considerados por el proceso de fabricación de tela acabada son los siguientes:

- Calentamiento global (kg CO₂ eq).
- Consumo de agua (m³).
- Eutrofización de agua dulce (kg P eq).
- Uso de suelos (m² por año).
- Escasez de recursos fósiles.
- Toxicidad humana no cancerígena.
- Ecotoxicidad terrestre.

a) Calentamiento Global

En base a las categorías determinadas, durante el análisis de ciclo de vida de la producción de 1 kg de tela acabada, ejecutada con el método ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.06 / World (2010) H, se obtuvieron los siguientes resultados:

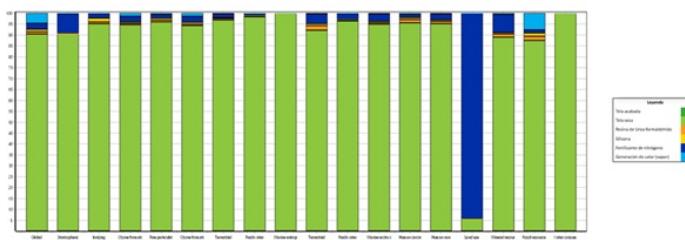


Fig. 4: Gráfico de Impactos ambientales generados en la producción de 1 kg de tela acabada.

De la Fig.4 se determina que el impacto ambiental de la producción de hilo de algodón es el más significativo. Por ejemplo, el cultivo de algodón representa el 2.6 % del consumo mundial de agua, lo que puede tener impactos relevantes en la disponibilidad de este recurso.

■ **Calentamiento Global (Global warming):** De acuerdo con la Fig. 4, el mayor impacto ambiental se identifica en la etapa de “Tela seca”, con la emisión de 10.7 kg de CO₂eq, seguido por la entrada “Heat, district or industrial, natural gas [PE] heat and power co-generation”, correspondiente a la etapa de “Tela teñida”, con un valor de 0.555 kg de CO₂eq, esto debido al consumo de calor.

■ **Ecotoxicidad terrestre (Terrestrial ecotoxicity):** Se determina que en la etapa de “Tela seca” se produce el mayor impacto respecto a las demás etapas analizadas, obteniéndose un resultado de 27.9 kg 1,4-DCB, seguido por la entrada “Nitrogen fertiliser, as N [RoW] urea ammonium nitrate production — APOS,S”, correspondiente a la etapa de “Tela acabada”, con una ecotoxicidad terrestre de 1.35 kg 1,4-DCB, esto último debido al uso de fertilizante de nitrógeno.

■ **Toxicidad humana no cancerígena (Human non-carcinogenic toxicity):** Al igual que en las demás categorías, se identificó que en la etapa de “Tela seca” se produce el mayor impacto con un valor de 13.3 kg 1,4-DCB, seguido por la entrada “Nitrogen fertiliser, as N [RoW] urea ammonium nitrate production — APOS,S”, correspondiente a la etapa de “Tela acabada”, con un valor de 0.159 kg 1,4-DCB, lo cual se relaciona con el uso de nitrógeno.

■ **Uso de suelos (Land use):** El uso de suelo tiene un total de 136 m², siendo uno de los impactos más relevantes. En el proceso de “Tela seca” también se observa un mayor impacto con 7.54 m², en comparación con la producción de urea ammonium nitrate, silicon product, nitrogen fertiliser as N [RoW] y heat industrial natural gas [PE].

■ **Escasez de recursos fósiles (Fossil resource scarcity):** Siendo de los más utilizados en la producción de fibras sintéticas para la fabricación de textiles, es también uno de los que genera más impacto ambiental (2.37 kg de oil), en comparación con la producción de urea ammonium nitrate, silicon product, nitrogen fertiliser as N [RoW] y heat industrial natural gas [PE].

■ **Consumo de agua (Water consumption):** El agua es un factor crítico, siendo este recurso uno de los más utilizados en los procesos de producción. Se estima que para producir 1 kg de algodón se necesitan entre 7,000 y 20,000 litros. Se observa que en el proceso de “Tela seca” el impacto es de 5.94 m³, seguido de calor (heat natural gas [PE]) con 0.000964 m³, y la producción de urea ammonium nitrate, silicon product y nitrogen fertiliser as N [RoW].

En conjunto, el análisis demuestra que los principales impactos ambientales de la fabricación de tela acabada se concentran en las etapas iniciales del proceso, particularmente en la producción y procesamiento del hilo de algodón. Este hallazgo refuerza la necesidad de focalizar los esfuerzos de mitigación en la selección de materias primas y en la optimización de las etapas de hilado y tejeduría.

La Fig.5 muestra el árbol de red generado por Sima Pro para el proceso de producción de 1 kg de tela acabada. Este diagrama, propio de la modelización en software de ACV, representa visualmente la estructura jerárquica y la secuencia de transformaciones que experimentan los materiales y flujos de energía desde el insumo principal (hilo de algodón) hasta la obtención del producto final. El árbol de red permite identificar, con precisión y transparencia, los insumos directos e indirectos, las conversiones intermedias (como tela cruda, tela teñida y tela seca), y los aportes relativos de cada etapa al proceso global, las rutas críticas de consumo de recursos y las oportunidades de mejora a lo largo del sistema, asímismo el árbol de red obtenido en Sima Pro no solo respalda la robustez y transparencia del modelado, sino que también se convierte en una herramienta estratégica para la toma de decisiones orientadas a la sostenibilidad y la eficiencia en la industria textil. A continuación, en la Fig.5 se detallan los Hotspots en la producción de 1 kg de tela acabada.

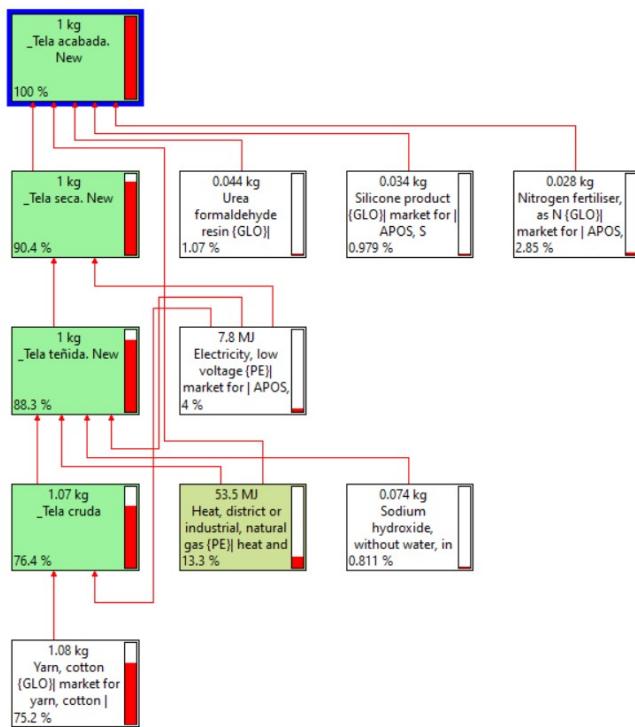


Fig. 5: Árbol de red, principales Hotspots de la producción de 1kg tela acabada del caso de estudio.

III-B7. Creación de Escenarios: Tal como se menciona en la Fig. 5, el inicio del análisis se enfocó en determinar cuál de los procesos de producción en la fabricación de tela acabada generaba el mayor impacto ambiental. En la Tabla I se muestra la participación de cada uno de los procesos en porcentaje de impacto ambiental. En base a estos resultados, se concluye que es la materia prima (hilo de algodón) quien genera el mayor impacto ambiental en todo el proceso productivo de fabricación de 1 kg de tela acabada, con un 75.2 % de participación.

Con esta información, se procedió a buscar una alternativa menos contaminante de materia prima.

Tabla I: Cuadro comparativo del impacto ambiental por proceso en la producción textil.

Proceso	% Impacto Ambiental 1	% Impacto Ambiental 2
Tela acabada	100.0	9.6
Tela seca	90.4	2.1
Tela teñida	88.3	11.9
Tela cruda	76.4	1.2
Yarn Cotton...	75.2	75.2

Evaluación Preliminar: El hilo de algodón como materia prima principal, evaluando dos variantes con implicancias ambientales contrastantes: algodón convencional y algodón orgánico. El algodón convencional proviene de cultivos intensivos que recurren a fertilizantes y pesticidas sintéticos, así como a Organismos Modificados Genéticamente (GMO), con el objetivo de maximizar los rendimientos agrícolas. En la tabla II se presenta de manera concisa las diferencias fundamentales entre ambos sistemas de cultivo, evidenciando su relevancia en el análisis ambiental y la toma de decisiones orientada a la sostenibilidad en la industria textil.

Tabla II: Cuadro comparativo: Algodón Convencional vs. Orgánico.

Algodón Convencional	Algodón Orgánico
En el cultivo se utilizan fertilizantes sintéticos (urea)	En el cultivo se utilizan fertilizantes naturales (estiércol, compost)
Se utilizan pesticidas y herbicidas sintéticos	Se utilizan pesticidas y herbicidas naturales
Promueve la maximización de la producción con mayores rendimientos de cultivos	Promueve la rotación de cultivos y prácticas de manejo de suelos
Permite la utilización de organismos modificados genéticamente (GMO)	No permite la utilización de organismos modificados genéticamente (GMO)

III-C. Análisis comparativo y evaluación de los impactos ambientales

Para el caso de **Tela acabada. Algodón Convencional**, se utilizó el método ReCiPe 2016 Midpoint (H) v1.06 / World (2010) H, tal como se muestra en la Fig. 6. En la Fig. 7 se presenta igualmente el diagrama de red de impactos ambientales para el proceso de Tela Acabada considerando Algodón Convencional.

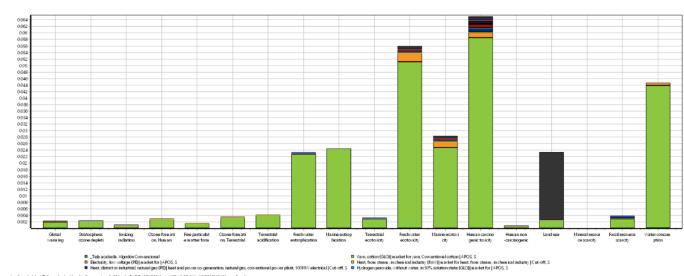


Fig. 6: Gráfico de Impactos ambientales Tela acabada. Algodón Convencional.

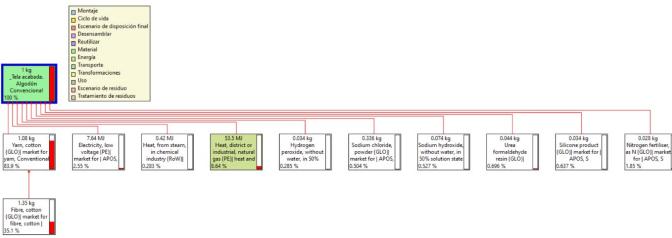


Fig. 7: Diagrama de Red de Impactos ambientales Tela acabada. Algodón Convencional.

Para el caso de **Tela acabada. Algodón Orgánico**, las figuras 6 y 8 presentan una comparación visual de los impactos ambientales asociados a la producción de 1 kg de tela acabada utilizando, respectivamente, algodón convencional y algodón orgánico como materia prima principal. Ambos gráficos fueron generados mediante el método ReCiPe 2016 Midpoint (H), lo que permite evaluar y contrastar objetivamente el comportamiento ambiental de cada alternativa a lo largo de las distintas categorías de impacto.

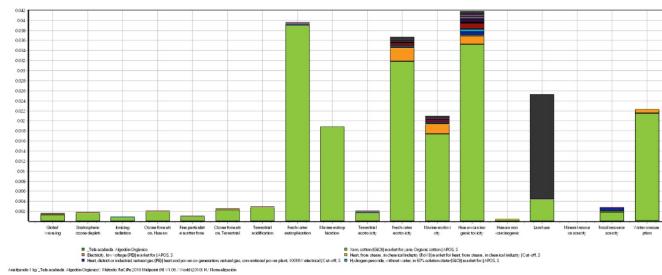


Fig. 8: Gráfico de Impactos ambientales Tela acabada. Algodón Orgánico.

La Fig.9 muestra el árbol de red de impactos ambientales generado para la producción de tela acabada a partir de algodón orgánico, permitiendo visualizar las rutas principales de consumo de recursos y emisiones dentro del sistema. Este diagrama destaca la trazabilidad de los flujos y facilita la identificación de los procesos clave donde se concentran los impactos ambientales en la alternativa orgánica.

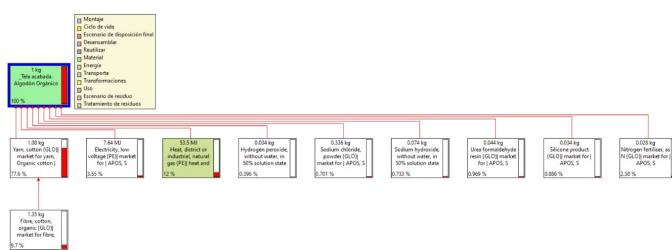


Fig. 9: Árbol de Red de Impactos ambientales Tela acabada. Algodón Orgánico.

Comparación de Resultados

La figura 10 ofrece una visión integral de los impactos ambientales generados en la producción de tela acabada a partir de algodón convencional y orgánico, permitiendo comparar el

desempeño de ambas alternativas en múltiples categorías de impacto:

- Tela acabada. Algodón Convencional
- Tela acabada. Algodón Orgánico

el método empleado en la comparación es el ReCiPe 2016 Midpoint (H) v1.06 / World (2010) el algodón orgánico muestra un mejor desempeño ambiental en la mayoría de las categorías, destacándose por sus menores contribuciones a la huella de carbono, la toxicidad humana y la contaminación de ecosistemas acuáticos. Sin embargo, se observa que en las categorías de eutrofización de agua dulce y uso de suelos, el impacto del algodón orgánico puede ser ligeramente mayor, debido a la necesidad de mayor superficie cultivada y la utilización de fertilizantes naturales, que pueden incrementar la carga de nutrientes en cuerpos de agua.

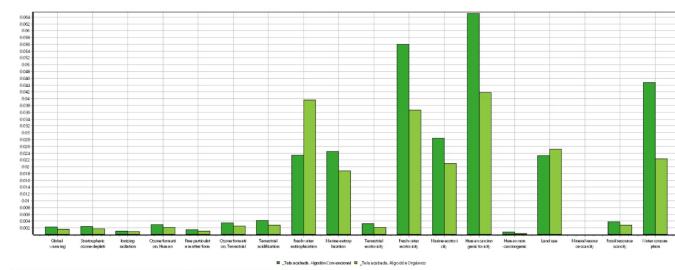


Fig. 10: Gráfico comparativo de Impactos ambientales: Algodón Convencional y Algodón Orgánico.

Interpretación de los resultados de las comparaciones.

En base a los resultados obtenidos en la Fig. 6 y Fig. 8, se determinó que los principales impactos ambientales generados en la producción de 1 kg de tela acabada con algodón convencional y orgánico son los siguientes:

- **Calentamiento Global (Global Warming):** Se identifica un mayor impacto ambiental en la producción de algodón a partir de fibra convencional respecto al de fibra orgánica, presentando un potencial de calentamiento global de 0.00227 kg de CO₂eq y 0.00163 kg de CO₂eq, respectivamente.
- **Toxicidad Humana Cancerígena (Human carcinogenic toxicity):** La producción de algodón convencional tiene mayor impacto (0.065 kg 1,4-DCB) respecto al orgánico (0.0418 kg 1,4-DCB).
- **Ecotoxicidad en agua dulce (Freshwater ecotoxicity):** El mayor impacto ambiental se da en la producción con algodón convencional (0.0559 kg 1,4-DCB) respecto al orgánico (0.0367 kg 1,4-DCB).
- **Consumo de agua (Water Consumption):** El mayor consumo de agua corresponde al algodón convencional (0.0447 m³) frente al orgánico (0.0224 m³).
- **Eutrofización de agua dulce (Freshwater eutrophication):** El mayor impacto ambiental proviene del algodón

orgánico (0.0397 kg P eq) respecto al convencional (0.0234 kg P eq).

- **Ecotoxicidad marina (Marine ecotoxicity):** El mayor impacto ambiental se genera en la producción con algodón convencional (0.0284 kg 1,4-DCB) respecto al orgánico (0.021 kg 1,4-DCB).
- **Eutrofización marina (Marine eutrophication):** El algodón convencional tiene mayor impacto (0.0245 kg N eq) respecto al orgánico (0.0188 kg N eq).
- **Uso de suelos (Land use):** El mayor impacto ambiental se deriva de la producción con algodón orgánico (0.0252 m²a crop eq) respecto al convencional (0.0233 m²a crop eq).

Este análisis comparativo evidencia que, aunque la transición hacia el algodón orgánico supone una reducción significativa en la mayoría de los impactos ambientales relevantes, aún persisten desafíos que requieren de estrategias de manejo sostenible y optimización de insumos agrícolas. La información aportada por este gráfico resulta fundamental para fundamentar decisiones informadas en la selección de materias primas y el diseño de procesos textiles más responsables y sostenibles.

Consideración de Co-beneficios y Trade-offs: Es importante evaluar tanto los co-beneficios como los *trade-offs* para obtener una visión completa y equilibrada de los impactos ambientales. Esto ayuda a asegurar que una mejora en una categoría no cause un impacto negativo significativo en otra, y a identificar oportunidades donde las acciones puedan generar múltiples beneficios. A continuación en la tabla III, describen las categorías de impacto ambiental según el tipo de algodón utilizado en la fabricación de 1 kg de tela acabada:

Tabla III: Cuadro de categoría de impactos: Algodón Convencional vs. Orgánico.

Categoría de impacto	Tela acabada. Algodón convencional	Tela acabada. Algodón orgánico
Calentamiento Global	Alto impacto: 0.00227 kg CO ₂ e	Bajo impacto: 0.00163 kg CO ₂ e
Toxicidad Humana Cancerígena	Mayor impacto: 0.065 kg 1,4-DCB	Menor impacto: 0.0418 kg 1,4-DCB
Ecotoxicidad en agua dulce	Mayor impacto: 0.0559 kg 1,4-DCB	Menor impacto: 0.0367 kg 1,4-DCB
Consumo de agua	Mayor consumo: 0.0447 m ³	Menor consumo: 0.0224 m ³
Eutrofización de agua dulce	Bajo impacto: 0.0234 kg P eq	Alto impacto: 0.0397 kg P eq
Toxicidad Humana no cancerígena	Mayor impacto: 0.000793 kg 1,4-DCB	Menor impacto: 0.000449 kg 1,4-DCB
Uso de Suelos	Menor impacto: 0.0233 m ² a crop eq	Mayor impacto: 0.0252 m ² a crop eq

La tabla III sintetiza los resultados más relevantes obtenidos en la comparación ambiental entre tela acabada elaborada con algodón convencional y aquella producida a partir de algodón orgánico. Más allá de los valores numéricos, estos resultados evidencian las complejas decisiones que enfrenta la industria textil al buscar un equilibrio entre productividad, competitividad y sostenibilidad ambiental, análisis revela que, optar por algodón orgánico conlleva beneficios notables en categorías clave como el calentamiento global, la toxicidad

humana y el consumo de agua. Los resultados no solo reflejan una mejora ambiental cuantificable, sino también el potencial que tiene la industria para reducir su huella ecológica y avanzar hacia procesos más responsables.

Selección de la mejor alternativa para la empresa de estudio.

Criterios de Selección: En la Tabla IV constituye un resumen comparativo multidimensional que permite evaluar, bajo un enfoque de sostenibilidad, las implicancias de elegir algodón convencional o algodón orgánico como materia prima para la producción textil. Este análisis no solo contempla los impactos ambientales, sino que integra consideraciones técnicas, económicas y sociales, aportando así una visión holística fundamental para la toma de decisiones estratégicas en la industria.

Tabla IV: Cuadro comparativo de impactos: Algodón Convencional vs. Orgánico.

Criterio	Tela acabada. Algodón Convencional	Tela acabada. Algodón Orgánico
Impactos Ambientales	Mayores emisiones de gases de efecto invernadero. El monocultivo empobrece los suelos y aumenta el riesgo de erosión. Es genéticamente modificado para resistir plagas o tolerar herbicidas, lo que puede afectar la biodiversidad. Menor eutrofización de agua dulce comparado con el orgánico. Requiere grandes cantidades de agua, sobre todo en sistemas de riego intensivo.	Menores emisiones de gases de efecto invernadero (aprox. 30 % menos). Suelos más saludables, mejor conservación de biodiversidad y menor contaminación del agua. No se permite el uso de semillas genéticamente modificadas, preservando la integridad genética y la biodiversidad. Mayor eutrofización de agua dulce por el uso de fertilizantes naturales y rotación de cultivos. Mejor retención hídrica, optimización del uso de agua (aprox. 50 % menos).
Aspecto técnico	Mayores rendimientos de cultivo por fertilización y pesticidas.	Rendimientos menores por ausencia de productos químicos intensivos.
Aspecto económico	Costo de hilado más barato.	Costo de hilado más caro (aprox. 20 % más).
Aspecto social	Mayor daño a la salud humana por uso de fertilizantes y pesticidas sintéticos (DALY 5.34E-5).	Menor daño a la salud humana (DALY 3.56E-5).

En síntesis, la tabla revela que la adopción del algodón orgánico representa una estrategia eficaz para atenuar impactos ambientales clave, como la huella de carbono, la contaminación por agroquímicos y los riesgos sanitarios asociados al modelo convencional. Por tanto, la selección de materia prima debe basarse en un análisis multicriterio que equilibre eficiencia agrícola, costos, demanda de recursos y externalidades ambientales y sociales, priorizando modelos productivos que no solo optimicen la rentabilidad, sino que aseguren la regeneración de los ecosistemas agrícolas, la resiliencia ante crisis y el cumplimiento de estándares internacionales de sostenibilidad..

CONCLUSIONES

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) identificó que el uso de hilo de algodón convencional contribuye con el 73 % del impacto total de calentamiento global en la producción de tela acabada (14.35 kg CO₂-eq por kg de tela), y más del 70 % en toxicidad humana no cancerígena y uso de suelos.

La transición a algodón orgánico permitió reducir el potencial de calentamiento global en un 29,6 % (de 14.35 a 10.11 kg CO₂-eq/kg), disminuir la toxicidad humana cancerígena en un 37,2 % y el consumo de agua en un 50,7 %, pasando de 341.54 a 168.28 litros por kg de tela. Sin embargo, el uso de suelos aumentó un 7,3 % y la eutrofización de agua dulce un 14,8 %, lo que evidencia la presencia de trade-offs ambientales.

El escenario combinado de algodón orgánico y energía fotovoltaica redujo el impacto global en calentamiento global hasta 9.72 kg CO₂-eq/kg, logrando una mitigación total del 32,2 % respecto al escenario base (algodón convencional con energía de red mixta) y económicamente, el hilado de algodón orgánico presentó un costo un 21 % mayor en comparación con el algodón convencional, implicando retos de competitividad, pero con potencial de compensación en mercados orientados a la sostenibilidad.

Los resultados refuerzan que, si bien la sustitución por algodón orgánico y el uso de energías renovables disminuyen considerablemente los impactos ambientales, es fundamental optimizar simultáneamente los manejos agrícolas, el uso de fertilizantes orgánicos y la eficiencia de los procesos industriales para evitar transferencias de impacto entre categorías.

IV. AGRADECIMIENTOS

Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas / UPC-EXPOST-2025-2

REFERENCIAS

- [1] F. Chen, X. Ji, J. Chu, P. Xu, and L. Wang, "A review: life cycle assessment of cotton textiles," *Industria Textila*, vol. 72, no. 01, p. 1797, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciendo.com/article/10.35530/IT.072.01.1797>
- [2] F. F. de Albuquerque Landi, C. Fabiani, B. Pioppi, and A. L. Pisello, "Sustainable management in the slow fashion industry: carbon footprint of an Italian brand," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 28, pp. 1229–1247, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02205-6>
- [3] S. Roy, Y. Y. J. Chu, and S. S. Chopra, "Life cycle environmental impact assessment of cotton recycling and the benefits of a take-back system," *Resources, Conservation & Recycling Advances*, vol. 19, p. 200177, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666719323000884>
- [4] S. Manshoven, M. Christis, A. Vercalsteren, M. Arnold, M. Nicolau, E. Lafond, L. F. Mortensen, and L. Coscieme, "Textiles and the environment in a circular economy," European Topic Centre on Waste and Materials in a Green Economy (ETC/WMGE), Tech. Rep., Nov. 2019, eionet Report - ETC/WMGE 2019/6. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/344413782_Textiles_and_the_environment_in_a_circular_economy
- [5] A. D. L. Rosa and S. A. Grammatikos, "Comparative life cycle assessment of cotton and other natural fibers for textile applications," *Fibers*, vol. 7, no. 12, p. 101, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-6439/7/12/101>
- [6] A. Fonseca, E. Ramalho, A. Gouveia, R. Henriques, F. Figueiredo, and J. Nunes, "Systematic insights into a textile industry: Reviewing life cycle assessment and eco-design," *Sustainability*, vol. 15, no. 3, p. 2543, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/3/2543>
- [7] G. Sandin and G. M. Peters, "Environmental impact of textile reuse and recycling – a review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 184, pp. 353–365, 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618305985>
- [8] T. Zhang, Y. Zhai, X. Ma, X. Shen, Y. Bai, R. Zhang, C. Ji, and J. Hong, "Towards environmental sustainability: Life cycle assessment-based water footprint analysis on China's cotton production," *Journal of Cleaner Production*, vol. 313, p. 127925, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127925>
- [9] K. Jaczynska, D. Ruto, K. Orner, and S. Mehta, "A comparative life cycle assessment of textile fiber production processes: Hemp versus cotton," *Cleaner Waste Systems*, vol. 11, p. 100277, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100277>
- [10] C. M. Arun, L. Panneerselvan, G. Nachimuthu, M. Conaty, and T. Palanisami, "Eco-innovative approaches for recycling non-polyester/cotton blended textiles," *Waste Management Bulletin*, vol. 3, pp. 255–270, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.100056>
- [11] N. M. van der Velden, M. K. Patel, and J. G. Vogtländer, "LCA benchmarking study on textiles made of cotton, polyester, nylon, acryl, or elastane," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 19, no. 2, pp. 331–356, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0626-9>
- [12] S. Moazzem, E. Crossin, F. Daver, and L. Wang, "Assessing environmental impact reduction opportunities through life cycle assessment of apparel products," *Sustainable Production and Consumption*, vol. 28, pp. 663–674, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.06.010>
- [13] G. S. Vitale, N. Iacuzzi, S. Zingale, S. Lombardo, T. Tuttolomondo, and P. Guaraccia, "Environmental sustainability of cotton: a systematic literature review of life cycle assessments," *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 22, p. 102069, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102069>
- [14] ISO, "ISO 14040:2006, 'environmental management – life cycle assessment – principles and framework,'" 2006.
- [15] A. Amato, K. Tsigkou, A. Becci, F. Beolchini, N. M. Ippolito, and F. Ferella, "Life cycle assessment of biomethane vs. fossil methane production and supply," *Energies*, vol. 16, no. 12, p. 4555, 2023.
- [16] ISO, "ISO 14044:2006, 'environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines,'" 2006.
- [17] J. M. Pires, "Life cycle assessment of biogas production," *Renewable Energy*, vol. 182, pp. 121–135, 2021.
- [18] A. Smith *et al.*, "Comparative lca of cooking systems: Biogas, lpg, and firewood," *Energy Policy*, vol. 148, p. 111932, 2022.
- [19] F. Valente, "Methodology for lca: Key aspects and challenges," *Sustainability*, vol. 13, no. 4, p. 2156, 2021.
- [20] S. Hellweg and L. M. i Canals, "Emerging approaches in life cycle assessment," *Science*, vol. 344, no. 6188, pp. 1109–1113, 2014.
- [21] M. Z. Hauschild and R. K. Rosenbaum, *Life Cycle Impact Assessment*. Springer, 2018.
- [22] J. Guinée *et al.*, "Life cycle assessment: Past, present, and future," *Environmental Science Technology*, vol. 45, no. 1, pp. 90–96, 2011.
- [23] K. Vogtländer, *A Practical Guide to LCA for Students, Designers and Business Managers*. VSSD, 2010.
- [24] B. Weidema *et al.*, "Overview and methodology: Data quality and uncertainty in life cycle inventories," *International Journal of LCA*, vol. 10, no. 3, pp. 145–158, 2005.

- [25] L. Goedkoop *et al.*, “Recipe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level,” National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Tech. Rep., 2013.
- [26] M. A. Curran, *Life Cycle Assessment Handbook: A Guide for Environmentally Sustainable Products*. Wiley, 2012.
- [27] P. D. Benedetto and C. Klemeš, *The Environmental Impact of Products: LCA Methodology*. Elsevier, 2020.
- [28] F. Pennington, “Guidelines for impact category selection in lca,” *Environmental Science Technology*, vol. 32, no. 5, pp. 1147–1153, 1998.
- [29] A. Finnveden *et al.*, “Recent developments in life cycle assessment,” *Journal of Environmental Management*, vol. 91, no. 1, pp. 1–21, 2009.