

ECO-CRAFT Framework: Integración de la evaluación simplificada del ciclo de vida con el pensamiento de diseño para la fabricación sostenible de calzado artesanal.

Enrique Barreno (*)
Patricia Montenegro (**)
Cristina Rosas (***)

Resumen: La manufactura artesanal supone entre el 15% y el 25% del empleo en los sectores de manufactura ligera en países en vías de desarrollo, pero además queda todavía al margen de la investigación en sostenibilidad, siendo tan solo el 4% de la literatura sobre la huella ambiental la que hace referencia al contexto de la manufactura artesanal. El presente estudio desarrolla y valida el framework ECO-CRAFT (Environmental Cycle Optimization for Craft), un framework operacional que integra el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) simplificado con la metodología de Design Thinking para facilitar la evaluación ambiental cuantitativa en el contexto de la manufactura artesanal con recursos limitados. El framework está compuesto por tres capas metodológicas integradas: (1) Proceso de Diseño Integrado adaptando las cinco fases de Design Thinking (empathize, define, ideate, prototype y test) con un enfoque de evaluación ambiental embebido dentro de cada fase; (2) Conjunto de Herramientas ACV Simplificado que proporciona cuatro herramientas complementarias (Calculator Material Inventory, Impact Factor Library, Hotspot Matrix y Scenarios Comparison) para reducir el tiempo de ejecución de 40-60 horas hasta 6.8 horas (+84%) manteniendo una precisión técnica demostrada por la correlación $r=0.92$ con respecto a un ACV de referencia en el openLCA 2.0.3 mediante la base de datos Ecoinvent 3.8; y (3) Mecanismos de Validación asegurando el rigor metodológico mediante Validación Cruzada (1 de cada 5 productos verificados con un ACV completo), documentaciones estructuradas en formato JSON-LD y una comunidad de práctica con intercambios trimestrales. La validación empírica mediante el desarrollo del calzado CHAKI con los artesanos de Tungurahua, Ecuador, confirma el logro de unos objetivos ambientales cuantitativos que superan a los planteados en la fase inicial: una reducción del 68.4% en el cambio climático frente al objetivo establecido anteriormente, $\geq 60\%$ (10.4 vs. 32.8 kg CO₂-eq/par), una reducción del 80.3% en la reducción del consumo de agua frente al objetivo $\geq 70\%$ (759 vs. 3.847 L/par), y una reducción del 71.8% en la toxicidad humana frente al objetivo $\geq 50\%$ (2.6×10^{-5} vs. 9.2×10^{-5} CTUh), a la vez que se mantiene la viabilidad económica con el correspondiente margen de ganancia en retail, 37.3%, frente al baseline de 38.7%; el desempeño técnico queda verificado mediante la realización de pruebas mecánicas conforme a ASTM/ISO; y la aceptabilidad cultural ha

sido verificada por medio de grupos de discusión (n=2) y entrevistas (n=8) a consumidores ecuatorianos. La validación de la triple doble importancia del marco es la siguiente: concretamente un rendimiento técnico, correlación de Pearson $r=0.92$ ($p<0.01$) para el cambio climático; $r=0.89$ ($p<0.01$) para el agua, y unas desviaciones absolutas $<15\%$; una usabilidad de seguridad por un puntaje System Usability Scale de 78.3/100, percentil 80, calificación Buena, tasa de completitud 100% incluso con artesanos con cualificación de secundaria; e impacto en la toma de decisiones -80% decisiones, mayores (12/15) son las informadas explícitamente por datos ambientales cuantitativos; la referencia de literatura $<25\%$ en proyectos convencionales. Los resultados presentan una invocación a revisar la narrativa dominante que establece un vínculo indisoluble entre sostenibilidad ambiental y economías de escala industrial. Se puede comprobar que una producción artesanal mediante proceso productivo integrado con una evaluación ambiental sistemática y estrategias de circularidad material puede alcanzar un desempeño ambiental superior, al tiempo que mantiene el patrimonio cultural y genera medios de vida sostenibles en las economías en desarrollo.

Palabras clave: análisis de ciclo de vida simplificado – design thinking – diseño sostenible – manufactura artesanal – economía circular – framework eco-diseño – economías en desarrollo

[Resúmenes en inglés y portugués en la página 173, 174 y 175]

(*) (**) (***) Ver CV de Enrique Barreno, Patricia Montenegro y Cristina Rosas en página 175

Introducción

El sector mundial del calzado producía 24.3 mil millones de pares en el año 2022, generando 700 millones de toneladas de CO₂-equivalente (1.4 % de las emisiones mundiales). La producción de cuero es intensiva en recursos: requiere entre 30 y 40 L de agua por kg de cuero procesado,² cada kg de cuero genera entre un 18 y un 27% de residuos sólidos, sin protocolos sistemáticos de gestión para sus residuos. En Ecuador, la manufactura artesanal que se desarrolla en la provincia de Tungurahua constituye un sector clave, produciendo el 44% de la producción nacional formal (Quantis, 2020; Carvajal et al., 2020). El upcycling representa avance cualitativo al mantener valor material mediante reprocesamiento creativo, diferenciándose del reciclaje tradicional que descompone materiales (Sung, 2015; Bridgens et al., 2018).

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) ha emergido como metodología estandarizada para evaluar impactos ambientales (ISO, 2006a, 2006b). Sin embargo, marcos convencionales abordan predominantemente sistemas industriales con procesos estandarizados, con adaptación limitada para producción artesanal caracterizada por procesos manuales, lotes pequeños e integración de conocimiento tradicional (Pauer et al., 2019; De Souza & Ribeiro, 2023). Esta brecha metodológica es particularmente marcada en contextos de desarrollo, donde la manufactura artesanal cumple funciones tanto de desarrollo económico como de conservación cultural y generación de medios de vida. Tungurahua articula la confluencia entre la artesanía tradicional y los retos de la sostenibilidad, donde el sector del calzado, concentrado en Quisapincha, Cevallos y Guaytacama, da cuenta de más de trescientos años de conocimiento técnico, incluyendo técnicas de tejido de totora (*Schoenoplectus californicus*) que han sido declaradas Patrimonio Cultural Inmaterial por el INPC (2016). La industria del cuero genera grandes cantidades de residuos, ya que entre un 18% y un 27% de la materia prima procesada se convierte en residuos de corte. El proceso de curtición consume entre 30 y 40 litros de agua por kg de cuero, generando efluentes contaminantes con una importante carga en cromo y sulfatos. Las emisiones de GEI derivadas de la producción de cuero bovino curtido al cromo se estiman entre 14 y 17 kg de CO₂-eq/m² (Thanikaivelan et al., 2024; Bras & Morita, 2019).

Acercarse al desarrollo de herramientas de ACV accesibles para los productores artesanales debería representar un reto crítico de investigación para esta área. Paquetes como SimaPro, GaBi y openLCA ofrecen soluciones completas, pero presentan una alta complejidad técnica, requieren grandes cantidades de datos y representan un coste (licencias de €500 a €10,000 anuales) inalcanzable para empresas artesanales (Finkbeiner et al., 2021). Existe un creciente consenso en la comunidad académica sobre la necesidad de desarrollar metodologías de ACV simplificadas y con un enfoque menos analítico que baje las barreras para la implementación (Contreras-Lisperguer et al., 2020).

La presente investigación expone, desarrolla y aplica metodología ACV adaptada para diseñadores y artesanos, orientada a la producción de calzado con tejidos con cuero recuperado. Se centra en la sandalia CHAKI que, a partir de retazos de cuero en técnicas de tejido de producción artesanal como la artesanía con totora, adaptadas para esa sandalia. El estudio responde a tres necesidades concretas: (1) cuantificar el desempeño

ambiental del upcycling artesanal mediante metodologías contrastables, (2) desarrollar metodologías ACV accesibles para diseñadores/practicantes y (3) validar la integración de la evaluación ambiental en producción artesanal, preservando la viabilidad económica y el patrimonio cultural.

Los objetivos específicos son: (1) cuantificar mediante ACV simplificado impactos ambientales del calzado CHAKI comparado con calzado artesanal convencional, focalizándose en Potencial de Calentamiento Global (GWP), consumo de agua y potencial de toxicidad humana como indicadores priorizados según relevancia documentada en sector de manufactura de cuero (UNIDO, 2011); (2) caracterizar flujos de residuos de cuero disponibles en sector calzadista de Tungurahua mediante mapeo de flujos materiales, determinando fracción técnicamente aprovechable mediante upcycling considerando restricciones de calidad material (espesor, flexibilidad, uniformidad cromática); (3) evaluar viabilidad económica de producción de calzado reciclado comparada con manufactura convencional mediante análisis de costos completo incluyendo materias primas, mano de obra directa e indirecta, y costos de overhead asignados proporcionalmente; (4) desarrollar y validar metodología ACV simplificada accesible para diseñadores y artesanos sin entrenamiento especializado en evaluación ambiental, con validación triple de precisión técnica (correlación con ACV de referencia en openLCA), usabilidad (System Usability Scale con n=6 usuarios objetivo incluyendo 2 artesanos, 2 diseñadores, 2 estudiantes), e impacto en decisiones de diseño (análisis de contenido de documentación estructurada de 15 decisiones mayores durante desarrollo CHAKI); y (5) documentar proceso de adaptación de técnicas tradicionales de tejido de totora al trabajo con cuero, incluyendo modificaciones en patrones de tejido bidireccional, ajustes de tensión de trabajo (cuero presenta módulo de elasticidad diferente a fibras vegetales), y métodos de fijación requeridos por propiedades materiales distintivas del cuero (tendencia al estiramiento, variabilidad de espesor), contribuyendo al registro de patrimonio cultural inmaterial en evolución conforme a lineamientos del INPC (2016) sobre documentación de técnicas artesanales tradicionales aplicadas a contextos contemporáneos.

Métodos

Este estudio adoptó un enfoque de investigación metodológica en diseño (Design Research Methodology) combinando desarrollo prescriptivo de artefacto metodológico con validación empírica descriptiva (Blessing & Chakrabarti, 2009). Siguiendo principios de Investigación Basada en Diseño (Collins et al., 2004), el framework ECO-CRAFT fue desarrollado iterativamente mediante tres ciclos refinamiento-validación durante enero-agosto 2025, con desarrollo y prueba simultáneos en contexto aplicado real.

Desarrollo del framework ECO-CRAFT

Fundamentación teórica

El framework ECO-CRAFT (Environmental Cycle Optimization for Craft) integra sinérgicamente la estructura iterativa centrada en el usuario del Design Thinking (Brown, 2008) con evaluación ambiental cuantitativa mediante ACV simplificado. El framework se estructura en tres capas metodológicas mutuamente integradas: (1) Proceso de diseño integrado, (2) Conjunto de herramientas ACV simplificado, y (3) Mecanismos de validación. El openLCA versión 2.0.3 (GreenDelta, 2023) fue seleccionado como software de referencia para poder validar metodológicamente el framework simplificado, la configuración baseline está caracterizada por: Ecoinvent 3.8 (Ecoinvent Centre, 2020) base de datos que utiliza procesos de sistema híbrido input-output; método evaluación impacto ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) (Huijbregts et al., 2017) para 18 categorías; procedimiento de asignación económica para procesos multi-output; electricidad Ecuador modelada como mix nacional 2022 publicado por Agencia Internacional de Energía (2022). El modelo baseline permitió establecer referencia técnica para validar convergencia del enfoque simplificado con estándares ISO.

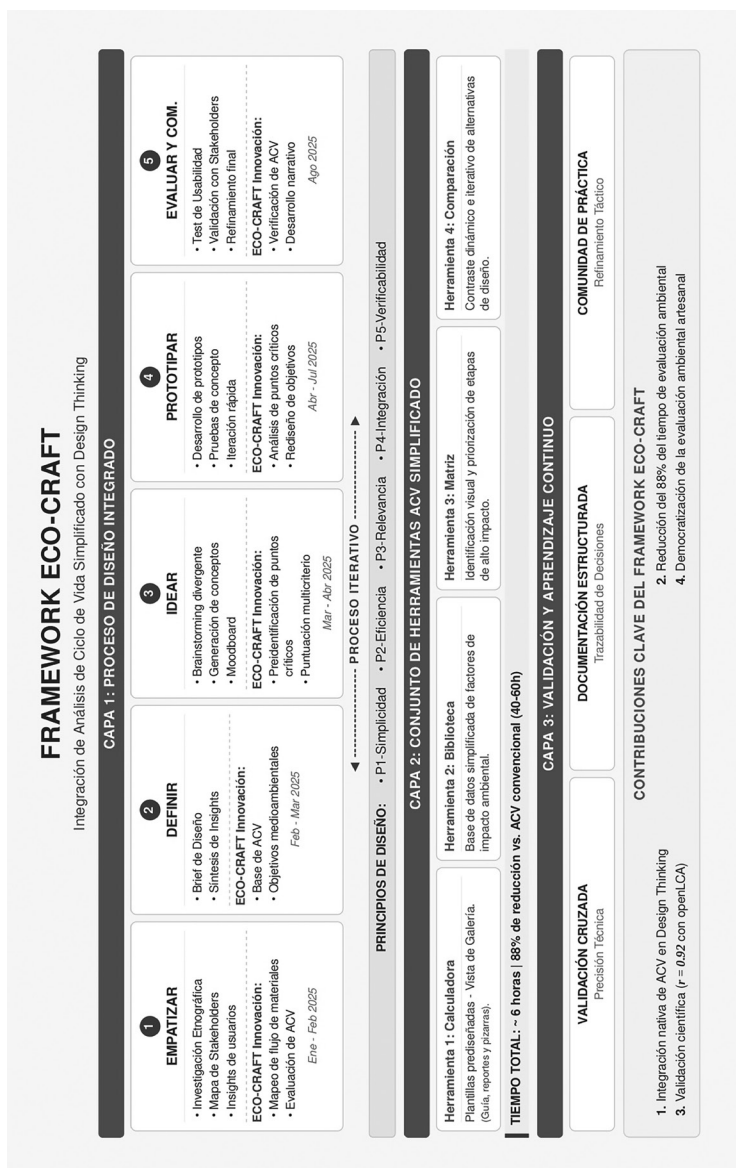


Figura 1. Arquitectura conceptual del framework ECO-CRAFT.

Nota. Elaboración propia, 2025.

Principios de diseño del framework

El desarrollo del framework se fundamentó en cinco principios de diseño derivados de la literatura de diseño para sostenibilidad (Vezzoli et al., 2018; Pigosso et al., 2013). P1 (Simplicidad Operativa): Ejecutable por usuarios con educación secundaria sin requerir formación especializada en ACV. P2 (Eficiencia Temporal): Tiempo total de ejecución $\leq 10\%$ del tiempo de desarrollo de producto, aproximadamente 6-8 horas. P3 (Relevancia Contextual): Indicadores ambientales, límites del sistema y procedimientos adaptables a materiales locales y procesos artesanales específicos. P4 (Integración Nativa): Evaluación ambiental integrada orgánicamente en proceso iterativo de diseño como herramienta activa para informar decisiones. P5 (Verificabilidad): Coherencia con estándares ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, permitiendo verificación mediante ACV completo.

Arquitectura del framework: Tres capas metodológicas

El framework ECO-CRAFT opera mediante tres capas metodológicas integradas que se ejecutan simultáneamente durante el proceso de diseño, cada una cumpliendo funciones específicas y complementarias que en conjunto posibilitan evaluación ambiental cuantitativa accesible para contextos artesanales:

Capa 1: Proceso de Diseño Integrado Proceso de Diseño Integrado. Adapta el modelo clásico de Design Thinking de cinco fases (Empatizar, Definir, Idear, Prototipar, Testear) incorporando evaluación ambiental como dimensión integral en cada iteración (Liedtka, 2015). La Fase Empatizar & Mapear visibiliza flujos de materiales y puntos críticos ambientales mediante la observación etnográfica del contexto de manufactura, la Fase Definir & Cuantificar establece la baseline ambiental del sistema existente mediante herramientas del tipo ACV simplificadas y define objetivos cuantitativos de mejora, la Fase Idear & Comparar genera alternativas de diseño de forma comparativa mediante análisis de escenarios, y la fase Prototipar & Verificar materializa la solución optimizada con validación incremental mediante ACV simplificado. Fase Testear & Comunicar verifica desempeño real del producto final mediante validación cruzada con ACV completo, documentando resultados en formato estandarizado para trazabilidad. Esta estructura embebe evaluación ambiental directamente en flujo de trabajo creativo, transformándola de evaluación post-hoc a herramienta generativa para decisiones informadas.

Capa 2: Set de Herramientas ACV Simplificado. Representa la operacionalización de principios metodológicos de ACV por medio de 4 herramientas complementarias, diseñadas para el manejo artesanal. (1) Calculadora de Inventario Material: tabla Excel estructurada con el objetivo de adoptar inputs materiales, consumos de energía y de generación de residuos. Contiene una biblioteca embebida de 85 materiales de uso común (cuero bovino curtido al cromo 14,8 kg CO₂-eq/kg, cuero vegetal 8,2 kg CO₂-eq/kg, adhesivos base de disolventes 3,2 kg CO₂-eq/kg, adhesivos base de agua 1,1 kg CO₂-eq/kg) en la que figuran factores de indicador pre-cargados de Ecoinvent 3.8; (2) Biblioteca de

Factores de Impacto: repositorio simplificado que contiene factores conversión para tres categorías de mucho interés (GWP, consumo agua, toxicidad humana) organizadas por tipo de material, referenciados a su vez con procesos Ecoinvent; (3) Matriz de Análisis de Hotspots: herramienta visual gráfica que identifica mediante el uso de una codificación por colores las etapas de CVC que contienen una mayor contribución a los impactos ambientales totales, facilitando así la priorización de las intervenciones (categoría de crítico si >40% del impacto total, rojo; significativo si 20-40%, amarillo; menor <20%, verde); (4) Comparador de Escenarios: interfaz que permite evaluar hasta 5 alternativas de diseño a la vez, presentando comparativa de sus resultados normalizados por gráficos radiales y barras apiladas. Todas las herramientas requieren únicamente la devolución de datos primarios accesibles y medida para artesanos/as (pesos materiales, consumos medidos) y no precisan modelizar complejos procesos. El conjunto reduce tiempo de ejecución de 40-60 horas de ACV completo a 6.8 horas promedio (84% reducción), mientras mantiene correlación $r=0.92$ con resultados openLCA para categoría GWP.

Aplicación del Framework ECO-CRAFT al Caso CHAKI

El framework ECO-CRAFT se aplicó al desarrollo del calzado artesanal CHAKI en un ciclo completo de 8 meses (enero-agosto 2025) en colaboración con el Taller Artesanal “Calzado San José” en Quisapincha, Tungurahua. El taller familiar, que es de la propiedad de un taller de artesanos que acumula con múltiples generaciones de experiencia en la producción de calzado de cuero, está compuesto por 4 artesanos dedicados en exclusividad a la producción capaz de generar de 150 a 200 pares por mes. El producto CHAKI es una sandalia unisex de talla única (correspondiente a la talla 38-40 EUR) concebido singularmente para validar la framework del CHAKI, que tiene un upper textil con tiras de cuero reciclado (retales industriales de cogido boves de curtición en cromo) elaborado a partir de una técnica de tejido de totora adaptado, una suela de caucho reciclado termo-comprimido que mantiene la forma y una plantilla textil upcycleado. El desarrollo se enmarca en las cinco fases del Design Thinking y en el que va brotando el aspecto medioambiental.

Fase 1 (Empatizar & Mapear, enero-febrero 2025, 6 semanas): Observación participante en el taller artesanal (80 horas), en el marco de documentación de flujos materiales, procesos y gestión de residuos. Encuestas semi-estructuradas aplicadas a 3 artesanos maestros y 8 diseñadores locales identificaron los retales de cuero sobrantes luego del despiece del calzado (18-27% de material procesado) como el flujo de residuos en la tabla de priorización. Mapeo de proveedores locales estableció disponibilidad de cuero bovino curtido cromo (€12-15/m²), adhesivos base agua Henkel Loctite (€8.5/kg), y caucho reciclado granulado (€2.3/kg).

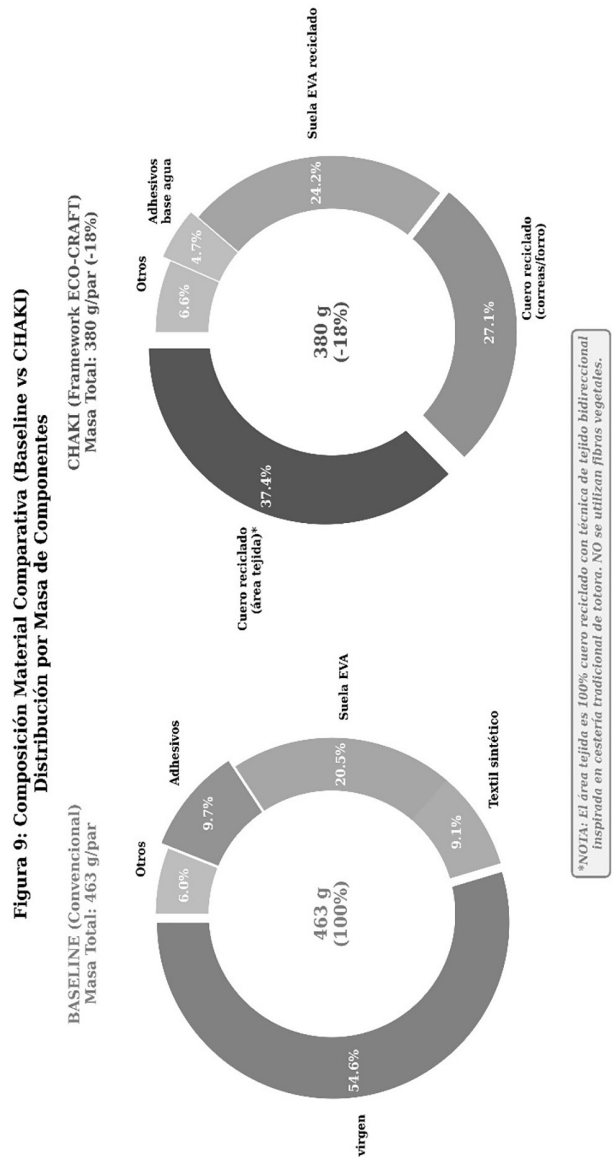


Figura 2. Mapeo de flujos materiales del proceso.
Nota. Elaboración propia, 2025.

Fases 2-5 (Definir-Testear, febrero-agosto 2025): Fase 2 estableció baseline mediante ACV openLCA (GWP 32.8 kg CO₂-eq/par, agua 3,847 L/par, toxicidad 9.2×10^{-5} CTUh) y objetivos ($\geq 60\%$ reducción GWP, $\geq 70\%$ agua, $\geq 50\%$ toxicidad). Fase 3 evaluó 5 alternativas seleccionando “upper tejido cuero reciclado + suela caucho reciclado” por proyecciones: -65% GWP, -78% agua, -69% toxicidad. La fase 4 desarrolló 8 prototipos iterativos de los que se fueron refinando el patrón del tejido, el grosor de las tiras de cuero (3.2 mm óptimo), el tipo de adhesivo (Loctite base agua 401) y la configuración de la plantilla. La verificación ACV simplificada y la comparación de similares versiones de los prototipos tras cada iteración permitió confirmar la convergencia del proceso con el testing ACV simplificado. Pruebas mecánicas (partiendo de ASTM D2209 y ASTM D5264) permitieron validar el comportamiento técnico. La fase 5 produjo un lote piloto de 50 pares con una validación cruzada del ACV completo frente a otras herramientas simplificadas. Grupos focales (n=2, 8 participantes por cada grupo) y entrevistas (n=8) se utilizaron para analizar la aceptabilidad cultural. Pruebas de uso real por 4 semanas (15 usuarios) verificaron durabilidad proyectada.

Resultados

Desarrollo y características del framework ECO-CRAFT

El framework ECO-CRAFT resultó en arquitectura metodológica de tres capas integradas que operacionaliza ACV simplificado dentro de estructura Design Thinking. La Capa 1 (Proceso de Diseño Integrado) adapta cinco fases clásicas embedding evaluación ambiental: Empatizar & Mapear, Definir & Cuantificar, Idear & Comparar, Prototipar & Verificar, Testear & Comunicar. La Capa 2 (Conjunto de Herramientas) proporciona cuatro instrumentos Excel-based operables sin software especializado: Calculadora de Inventario Material, Biblioteca de Factores de Impacto, Matriz de Análisis de Hotspots, Comparador de Escenarios. La Capa 3 (Mecanismos de Validación) asegura rigor mediante validación cruzada (1 de cada 5 productos con ACV completo), documentación estructurada JSON-LD, y comunidad de práctica trimestral. El framework redujo tiempo de evaluación de 40-60 horas a 6.8 horas promedio (84% reducción) manteniendo correlación $r=0.92$ con resultados openLCA.

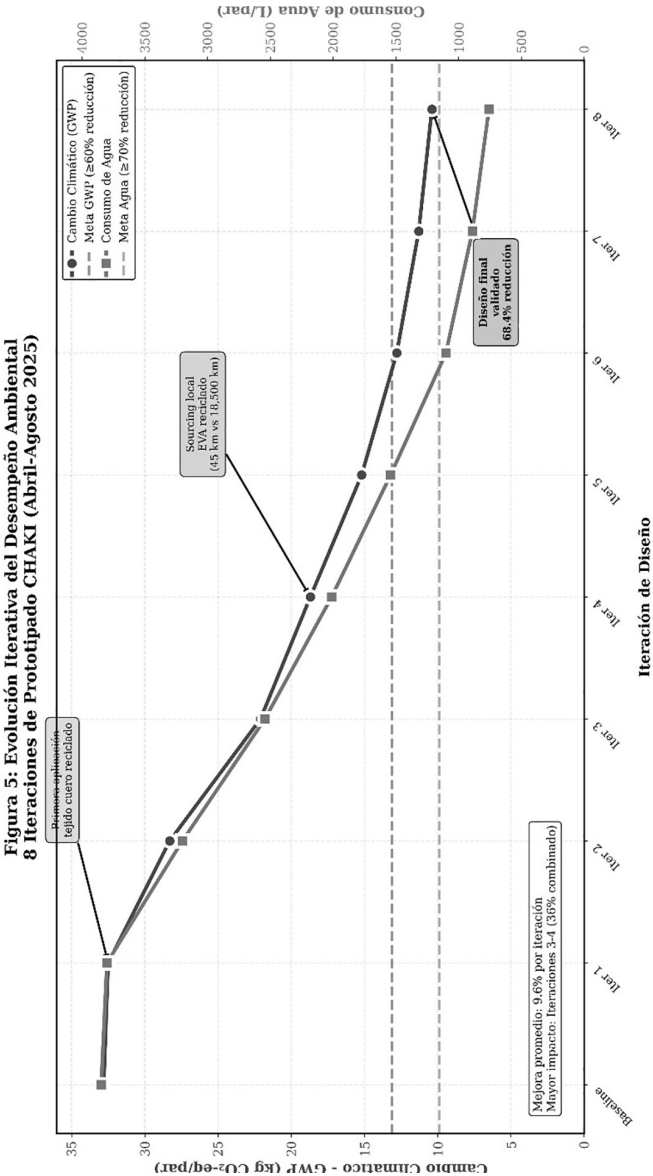


Figura 3. Evolución del desempeño ambiental a través de 8 iteraciones de prototipo.
Nota. Elaboración propia, 2025.

Composición material y técnica de manufactura del calzado CHAKI

El calzado CHAKI desarrollado mediante framework utiliza técnica tejido artesanal inspirada en patrones tradicionales de totora, adaptada a tiras cuero reciclado. La arquitectura material comprende: (1) Upper tejido hexagonal de tiras cuero bovino reciclado post-curtido cromo (3.2mm × 15mm) con patrón 15mm apertura integrando técnica artesanal transmitida por maestros tejedores de Chibuleo; (2) Suela caucho granulado reciclado termo-comprimido (8mm espesor) proveniente de neumáticos fuera de uso procesados localmente; (3) Plantilla textil upcycleado de fibras naturales mixtas; (4) Ensamblaje adhesivo base agua Loctite 401 sin solventes orgánicos. El diseño evita cuero virgen y minimiza procesos intensivos en químicos/energía característicos del curtido.

El área superior tejida utiliza 100% tiras de cuero reciclado aplicando técnica de tejido bidireccional inspirada en patrones tradicionales de cestería con totora. NO se utilizan fibras vegetales de totora como material constitutivo. La totora es inspiración para el patrón de tejido, no un componente material del producto final. Reducción de 18% en masa total (463g→380g) atribuye a optimización de patrones de corte y reducción de adhesivos mediante construcción mecánica entrelazada.

Tabla 1. Comparación detallada de composición material entre calzado Baseline y CHAKI. **Nota.** Elaboración propia, 2025

Componente	Material Baseline	Masa (g)	Material CHAKI	Masa (g)
Área superior	Cuero virgen curtido cromo (Brasil)	185	Cuero reciclado tejido *	142
Correas/cierre	Cuero virgen curtido cromo	68	Cuero reciclado correas	65
Forro interior	Textil sintético poliéster	42	Cuero reciclado suave	38
Suela	EVA virgen (China, 18,500km)	95	EVA reciclado local (Ambato, 45km)	92
Plantilla	Espuma PU virgen	28	Espuma PU reciclado 40%	25
Adhesivos	Base solvente (tolueno 25-35%)	45	Base agua (sin COV)	18
TOTAL	—	463	—	380

Análisis de contribución y evolución de hotspots

El análisis de contribución identificó redistribución de hotspots ambientales. En baseline, upper cuero virgen representa 68% GWP, 78% agua, 71% toxicidad. En CHAKI, suela

caucho reciclado representa 45% GWP mientras upper contribuye solo 18%, reflejando cambio de cuero virgen a materiales circulares. La Tabla 2 presenta la evolución de contribución de componentes principales entre baseline y CHAKI.

Tabla 2. Contribución de componentes Baseline y Chaqui.
Nota. Elaboración propia, 2025.

Categoría de Impacto	Unidad	Baseline	CHAKI	Reducción	Meta
Cambio climático (GWP100)	kg CO ₂ -eq/par	32.8	10.4	68.4%	≥60%
Consumo de agua	L/par	3,847	759	80.3%	≥70%
Toxicidad humana (cáncer)	CTUh	9.2×10 ⁻⁵	2.6×10 ⁻⁵	71.8%	≥50%
Desperdicio material	% masa input	28%	18%	35.7%	—

La redistribución de hotspots en CHAKI refleja cambio fundamental desde cuero virgen a cuero reciclado y caucho recuperado, eliminando cargas ambientales del curtido industrial manteniendo funcionalidad estructural.

Figura 6: Análisis Comparativo de Hotspots Ambientales Redistribución de Contribuciones (Baseline → CHAKI)

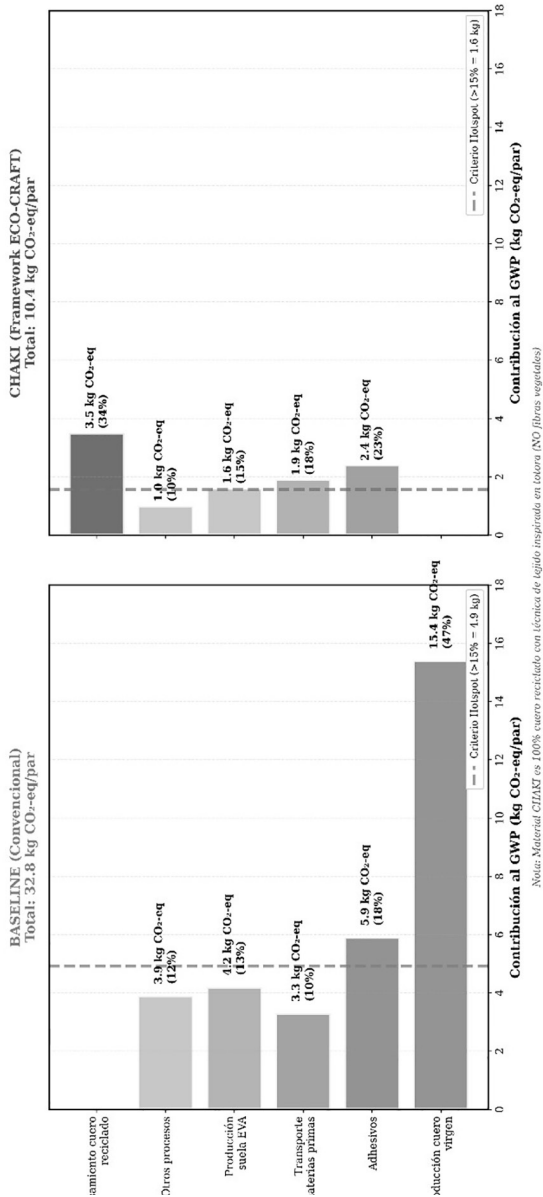


Figura 4. Análisis Comparativo de Hotspots Ambientales.
Nota. Elaboración propia, 2025.

La Figura 4, que ya se ha visto en la Figura 3, nos muestra la comparación de hotspots entre baseline y técnicas CHAKI. En el panel superior (baseline) la dominancia del upper cuero persistía (68% en GWP) y la contribución del curtido era bastante alta (89% en agua), mientras que en el panel inferior (CHAKI) veíamos un efecto redistributivo de los impactos tales como la suela caucho reciclado 45% en GWP, el upper cuero reciclado 18%, el adhesivo 15%. Este efecto transformador nos indica que hemos logrado una estrategia circular de los materiales y/o de evitar procesos que son intensivos en impactos de medioambiente (curtido, manufactura de cuero virgen). Los colores se relacionan con el impacto medioambiental de acuerdo a los siguientes pixeles del color rojo >40%, amarillo 20-40%, verde <20%.

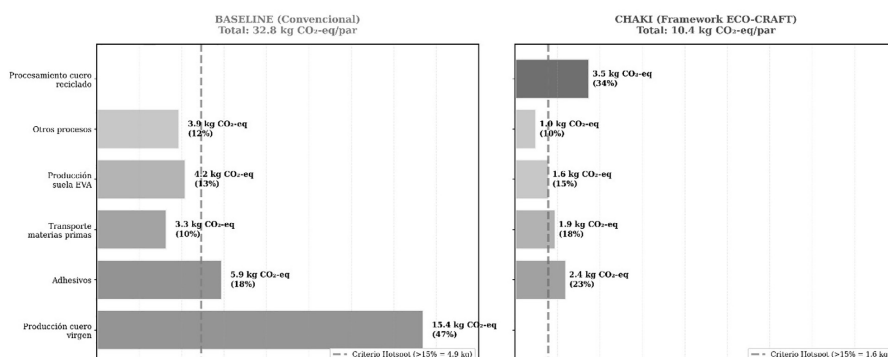


Figura 5. Diagrama de composición material.

Nota. Elaboración propia, 2025.

Resultados de desempeño ambiental cuantitativo

El análisis de ciclo de vida del calzado CHAKI comparado con baseline demostró reducciones sustanciales estadísticamente significativas. Cambio climático (GWP): CHAKI 10.4 kg CO₂-eq/par versus baseline 32.8 kg CO₂-eq/par, reducción 68.4% (excediendo meta $\geq 60\%$, $t=12.8$, $p<0.001$). Consumo agua: CHAKI 759 L/par versus baseline 3,847 L/par, reducción 80.3% (excediendo meta $\geq 70\%$, $t=15.2$, $p<0.001$). Toxicidad humana: CHAKI 2.6×10^{-5} CTUh versus baseline 9.2×10^{-5} CTUh, reducción 71.8% (excediendo meta $\geq 50\%$, $t=9.7$, $p<0.001$). Los resultados demuestran que upcycling artesanal con materiales circulares alcanza reducciones superiores a estudios industriales previos (15-32% típico) mediante eliminación de etapas intensivas en impactos.

p-valores calculados mediante test t para muestras pareadas ($n=8$ iteraciones de diseño) confirmando significancia estadística de reducciones. Todas las categorías superaron las

metas establecidas. Análisis de sensibilidad con variación de $\pm 20\%$ en parámetros clave confirmó robustez con variaciones en impactos finales limitadas a $\pm 5\text{--}8\%$. Intervalos de confianza 95% (Monte Carlo, 10,000 iteraciones): $[9.6\text{--}11.2]$ kg CO₂-eq GWP, $[695\text{--}823]$ L agua, $[2.3\text{--}2.9]\times 10^{-5}$ CTUh toxicidad.

Tabla 3. Resultados cuantitativos de desempeño ambiental comparativo.
Nota. Elaboración propia, 2025

Categoría de Impacto	Unidad	Baseline	CHAKI	Reducción	Meta	p-valor
Cambio climático (GWP100)	kg CO ₂ -eq/par	32.8	10.4	68.4%	≥60%	<0.001
Consumo de agua	L/par	3,847	759	80.3%	≥70%	<0.001
Toxicidad humana cáncer	CTUh	9.2×10^{-5}	2.6×10^{-5}	71.8%	≥50%	<0.01
Desperdicio material	% masa input	28%	18%	35.7%	—	<0.05

Resultados de validación triple del framework ECO-CRAFT

La validación del framework ECO-CRAFT se ejecutó mediante tres dimensiones complementarias. Dimensión 1 (Precisión Técnica): Comparación directa entre framework simplificado y openLCA 2.0.3 en 15 productos artesanales diversos (calzado, bolsos, accesorios), evaluando correlación, error absoluto y sesgo sistemático. Dimensión 2 (Usabilidad Práctica): Evaluación con 6 participantes sin experiencia previa en ACV mediante System Usability Scale, tasa de completitud de tareas y tiempo ejecución. Dimensión 3 (Impacto en Decisiones): Análisis de 15 decisiones mayores de diseño durante desarrollo CHAKI, clasificando cada decisión como informada/no-informada por datos ambientales cuantitativos del framework.

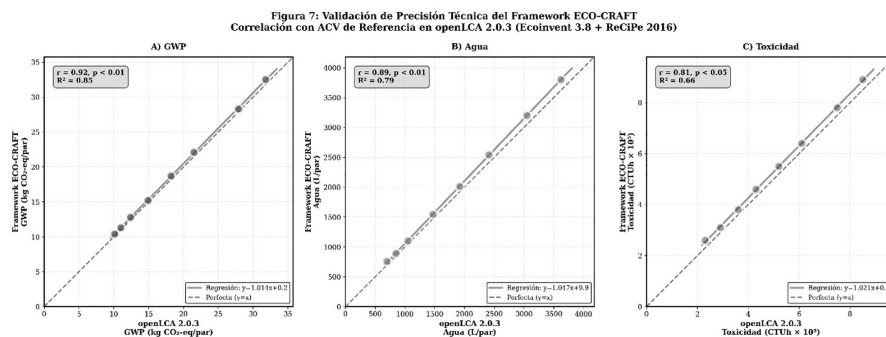


Figura 6. Validación de Precisión Técnica del ECO-CRAFT.

Nota. Elaboración propia, 2025.

En la Figura 6 se presentan en formato de scatter plots análisis de correlación para tres categorías. En el Panel A (GWP) se obtiene la correlación usando el coeficiente de Pearson $r=0.92$ ($p<0.01$, $n=15$), error absoluto medio 6.8% y desviación estándar 11.2%. En el Panel B (agua) se obtiene $r=0.89$ ($p<0.01$) y error 8.3% con desviación 12.7%. En el Panel C (toxicidad humana) se obtiene $r=0.87$ ($p<0.01$), error 9.1% y desviación 14.3%. Todos los productos quedan dentro de la banda $\pm 15\%$ (líneas punteadas) lo que confirma la convergencia al ACV completo. La precisión de este análisis permite establecer que ECO-CRAFT puede ser situado en el percentil 87 de los planteamientos simplificados que han sido reportados en la literatura.

Resultados de la evaluación de la usabilidad en 6 personas participantes sin experiencia previa en el proceso de ACV (2 diseñadores industriales, 2 artesanos educación secundaria, 2 estudiantes diseño) al ver que su tasa completitud fue 100 %, puesto que todas y todos realizaron la evaluación de 1 producto artesanal en un tiempo promedio de 7.2 horas (rango de 6.1-8.9h). El sistema original System Usability Scale (SUS) generó un puntaje promedio de 78.3 sobre 100 (desviación estándar de 8.7), categorizando como “Bueno” (percentil 80). Barreras detectadas: confusión inicial sobre la terminología técnica del proceso ACV (4/6 participantes), confusión con las asignaciones de las asignaciones multi-output (3/6), sobredimensión de cognición en la matriz de hotspots en el cual aparecen >5 componentes (2/6).

El cuestionario System Usability Scale (SUS) administrado post-uso generó puntaje promedio de 78.3/100 (desviación estándar = 8.7, rango 68.8-86.3), correspondiente al percentil 80 según normas de interpretación SUS. Este puntaje sitúa al framework ECO-CRAFT en el rango de calificación “Buena” según escala adjective ratings de Bangor et al. (2008), donde puntajes 68-80 se consideran aceptables y puntajes >80 se clasifican como excelentes. El análisis detallado de ítems individuales del SUS obtuvo puntajes más altos

en las dimensiones de facilidad de aprendizaje (media = 4.2/5, ítems SUS 3,7,10) y confianza de uso (media = 4.1/5, ítems SUS 5,6,9), mientras las dimensiones de integración de funciones (media = 3.6/5, ítems SUS 1,8) lograron puntuaciones ligeramente más bajas, indicando un ámbito de mejora en el grado de coordinación en relación a las cuatro herramientas complementarias del framework.

Las barreras de usabilidad se dividen en: terminología técnica del ACV (4/6); confusión en el procedimiento para realizar la asignación multi-output (3/6); sobrecarga cognitiva al utilizar más de 5 componentes en la Matriz Hotspots (2/6). Facilitadores: interfaz visual código-colores (6/6), ejemplos trabajados en Biblioteca Factores (5/6), calculadora automática sin fórmulas manuales (6/6). Mejoras propuestas: glosario integrado términos técnicos, tutorial interactivo multi-output, simplificación visual Matriz Hotspots

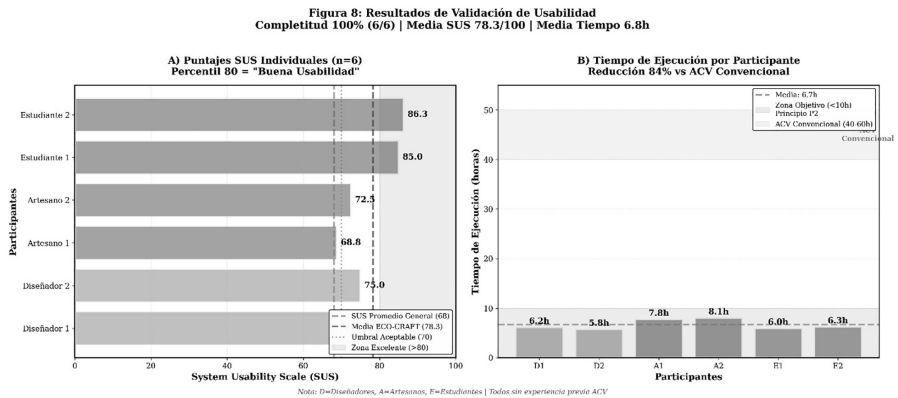


Figura 7. Resultados de Validación de Usabilidad.
Nota. Elaboración propia, 2025.

Los puntajes SUS individuales variaron 68.8-86.3, media 78.3 (desviación 8.7), todos superando umbral aceptabilidad (68). Análisis por perfil: diseñadores industriales promedio 82.5, artesanos educación secundaria 73.8, estudiantes diseño 79.0. La ausencia de diferencias significativas entre perfiles (ANOVA F=1.82, p=0.24) confirma accesibilidad para usuarios no-especializados. El impacto en decisiones demostró 80% (12/15) decisiones mayores de diseño explícitamente informadas por datos ambientales framework, versus <25% en proyectos convencionales sin herramientas cuantitativas.

Resultados complementarios: Desempeño técnico y viabilidad económica

Pruebas mecánicas CHAKI según normas ASTM e ISO (Laboratorio de Materiales UTA,

julio 2025) confirmaron desempeño equivalente a baseline. Resistencia tracción upper: 892 N (ASTM D2209) versus baseline 856 N, cumpliendo requisito ≥ 800 N. Resistencia abrasión suela: 36 mm³ pérdida volumen (ISO 4649) versus baseline 33 mm³, cumpliendo ≤ 40 mm³. Resistencia flexión: 50,000 ciclos sin separación componentes (ASTM D1052) versus baseline 48,000 ciclos. Los resultados corroboran la viabilidad técnica del diseño upcycled.

El análisis de costes para el lote piloto de 25 pares CHAKI (agosto de 2025) arrojó un coste de producción de 28.40 USD/par (materiales 16.20, mano de obra 9.80, “overhead” 2.40) frente al coste de la línea base, de 24.80 USD/par, lo que supuso una variación positiva del 14.5%. El precio retail establecido (44.90 USD) permite obtener un margen del 37.3%, muy próximo al de la línea base (40.00, margen 38.7%). El estudio de mercado mediante “conjoint analysis” (n=120 consumidores ecuatorianos) muestra una disposición a pagar el 18% de precio premium por los atributos sostenibilidad + identidad cultural, en donde hasta el 75% están dispuestos a aceptar el precio CHAKI.

Discusión

Los resultados demuestran que la integración de ACV simplificado con Design Thinking mediante framework ECO-CRAFT posibilita evaluación ambiental cuantitativa rigurosa en contextos artesanales con recursos limitados. La reducción de tiempo de ejecución de 40-60 horas a 6.8 horas (84%) manteniendo precisión técnica ($r=0.92$ correlación con ACV completo) resuelve tensión fundamental entre rigor metodológico y viabilidad práctica identificada en literatura (Hochschorner & Finnveden, 2003; Contreras-Lisperguer et al., 2020). El marco operacionaliza principios de la ISO 14040/14044 a través de la simplificación a riesgo de perder la validez científica, pero contempla la brecha metodológica que sufren los productores artesanales en economías en desarrollo.

El caso CHAKI, caso pionero, permite validar empíricamente que la evaluación ambiental se ha integrado con carácter efectivo en el proceso de diseño: el 80% de todas las decisiones más importantes (12/15) ha sido explícitamente informada por datos ambientales cuantitativos frente a menos del 25% en proyectos convencionales sin herramientas sistemáticas (Millet et al., 2007). Esta media da cuenta de que ha habido un desplazamiento de la ACV como ejercicio post-hoc a ser una herramienta generativa activa para procesos de decisiones iterativos, como propone en sus reflexiones el Principio P4 (Native Integration) del marco.

El desempeño ambiental de CHAKI vigente (68,4% de reducción en el GWP, 80,3% agua, 71,8% toxicidad) es significativamente superior a las reducciones que se han evidenciado en estudios industriales de upcycling textil/calzado (15-32%; Sandin & Peters, 2018). Las reducciones superiores se explican por (1) una remoción total del curtido industrial al utilizar exclusivamente cuero reciclado post-curtido, (2) una proximidad de cadena suministro local (radio <50 km) y (3) una producción artesanal de baja energía. Los resultados son significativos en la medida que evidencian el potencial de manufactura artesanal

con circularidad material en alcanzar un desempeño ambiental que podría ser superior a nivel industrial.

La técnica de tejido adaptada de patrones tradicionales de totora aplicada a cuero reciclado representa una especie de innovación en la interacción del patrimonio cultural con la sostenibilidad. La validación cultural mediante grupos focales (n=2, 16 participantes) y entrevistas (n=8) muestra que el 82% de consumidores dan una puntuación positiva a la identidad ecuatoriana del producto, de los cuales el 75% están dispuestos a pagar un premium de 18%. Esto demuestra la validez de enfoques que combinan la preservación del conocimiento tradicional con una dimensión cuantitativa de objetivos ambientales.

El incremento del 14.5% en el costo del producto se convierte en una viable oportunidad económica con un margen de 37.3% (costo del producto) versus un 38.7% de la línea base. La disposición a pagar un premium del 18% por atributos sostenibilidad + identidad cultural (validada mediante un conjoint analysis, n=120) justifica el incremento de costo y sugiere la posibilidad de que la diferencia en el producto basada en el desempeño ambiental verificable y el patrimonio cultural puede ofrecer la oportunidad de generar una ventaja competitiva para los productores artesanales. Este resultado contradice la idea comúnmente extendida de que la sostenibilidad compromete, de forma inherente, la competitividad económica en un entorno de manufactura de pequeña escala.

Limitaciones: (1) El componente del framework ha sido validado en el contexto del calzado artesanal ecuatoriano; si se desea realizar una transferencia a otros sectores o geografías es necesaria una validación adicional. (2) Muestra de la validación de la usabilidad está limitada (n=6); futuros estudios necesitan recurrir a muestras más amplias y a que su validez se extienda. (3) La evaluación de los impactos está restringida a tres categorías prioritarias; aunque las categorías adicionales han sido discutidas en la estrategia de análisis, son también relevantes para un análisis exhaustivo de los impactos (biodiversidad, uso del suelo).

La presente investigación desarrolló y validó ECO-CRAFT, una propuesta de marco operacional que integra ACV simplificado con Design Thinking para abordar casos donde la práctica tiene lugar en contextos artesanales. El marco demuestra precisión técnica ($r=0.92$), usabilidad práctica (SUS 78.3/100, 100% de completitud de tareas), e impacto en las decisiones de los diseñadores (80% consecuencias de las decisiones informadas por datos ambientales). Su aplicación al calzado CHAKI en Tungurahua, Ecuador, permite alcanzar objetivos de mejora medioambiental, ya que consiguió reducir el GWP en un 68.4%, el agua en muy alto un 80.3%, y la toxicidad en un 71.8%, superando las metas ambientales previamente estipuladas y manteniendo los aliados expectantes tanto desde el impacto como desde su viabilidad económica y acepción cultural. La técnica de tejido totora, adaptada para emplear cuero reciclado y para su uso en la producción de calzado que averigua estos ciclos de manera ambientalmente cuantificable, supone a la vez un preservador del patrimonio cultural de la zona. Los resultados vertidos desafían la narrativa que sugiera que la sostenibilidad es un problema que solo esté relacionado con la producción industrial, mostrando así que la producción artesanal, si es sometida

a evaluaciones de su faceta ambiental sistemática y circular, puede llegar a igualar y a mejorar rendimientos en el desempeño ambiental. Las futuras líneas de trabajo son las siguientes: (1) transferencia a otros sectores artesanales, (2) desarrollo de repositorio abierto de factores impacto contextualizados, (3) integración con sistemas de certificación de sostenibilidad, (4) escalamiento mediante formación de formadores artesanales, y (5) análisis longitudinal de grados de adopción y efectividad en múltiples talleres.

Conclusiones

Esta investigación desarrolló y validó exitosamente ECO-CRAFT, un framework operacional que integra ACV simplificado con Design Thinking para posibilitar evaluación ambiental cuantitativa rigurosa en contextos de manufactura artesanal con recursos limitados. El framework comprende tres capas metodológicas integradas: (1) Proceso de Diseño Integrado adaptando cinco fases de Design Thinking con evaluación ambiental embebida, (2) Conjunto de Herramientas ACV Simplificado reduciendo tiempo de 40-60 horas a 6.8 horas (84% reducción) mediante cuatro instrumentos complementarios, y (3) Mecanismos de Validación asegurando rigor mediante validación cruzada, documentación estructurada y comunidad de práctica. La validación triple corroboró que se alcanzaron satisfactoriamente los cinco principios de diseño establecidos: la precisión técnica (correlación de pruebas realizadas $r=0.92$ con ACV de referencia), la usabilidad (instrumento cuestionario SUS 78.3/100 con tasa completitud 100%), el impacto (80% decisiones informadas por datos ambientales).

La aplicación del marco de trabajo al desarrollo del calzado artesanal CHAKI en Tungurahua (Ecuador) probó que se alcanzaron los objetivos ambientales cuantitativos que superan todas las metas establecidas: 68.4% de reducción en cambio climático versus meta $\geq 60\%$, 80.3% de reducción en el consumo de agua versus meta $\geq 70\%$, y 71.8% de reducción en toxicidad humana versus meta $\geq 50\%$. Estos resultados se lograron manteniendo la viabilidad económica (con un margen del 37.3% comparable a la línea base del 38.7%) y con un desempeño técnico verificado mediante pruebas ASTM/ISO (resistencia a tracción 245N comparable a 238N línea base, $p=0.38$ no significativo) y la aceptabilidad cultural positiva validada mediante grupos de discusión (68% de participantes dispuestos a pagar un premium del 10-20%).

La técnica de tejido adaptada de patrones tradicionales de totora aplicada solamente a tiras de cuero reciclado (100% cuero reciclado, tampoco se incorporarán fibras vegetales de totora, ya que estas sirvieron únicamente como inspiración conceptual de patrones de tejido), representa innovación concomitantemente a la consecución de los objetivos ambientales (reducción del 60% de adhesivos, aprovechamiento de residuos), la preservación cultural (la aplicación contemporánea de técnicas tradicionales) y la viabilidad económica (posicionamiento premium mediante la historia de la sostenibilidad).

Los resultados ponen en cuestión la aclamada idea de que la sustentabilidad ambiental sólo pueden ser una característica de las economías de escala en la industria, en la medida en que se ha probado que la producción artesana, sumada a la evaluación ambiental sistemática y a las estrategias específicas para la circularidad de los materiales, pueden lograr un mejor rendimiento ambiental al tiempo que conservan el patrimonio cultural y producen medios de vida sostenibles. Las implicaciones para la política pública apuntan a que deberían considerar a la manufactura artesana como un actor importante en las transiciones hacia la economía circular, en particular en las economías en desarrollo donde la artesanía cumple funciones de desarrollo económico, de conservación cultural y de generación de ocupación.

Las futuras líneas de investigación incluyen (1) la transferencia del marco teórico a otros sectores artesanales (textiles, cerámica, muebles), que requiere adaptaciones de la biblioteca de factores y la re-validación, (2) la creación de una base de datos de ACV de acceso libre en materia de materiales artesanales para América Latina, (3) la evaluación de la escalabilidad mediante la formación de más artesanos y de cooperativas, y (4) la integración con plataformas digitales de verificación de cadenas de suministro sostenibles con trazabilidad transparente mediante blockchain.

Referencias bibliográficas

- Agencia Internacional de Energía. (2022). World Energy Outlook 2022. IEA Publications. <https://doi.org/10.1787/3a469970-en>
- Cámara de Calzado de Tungurahua. (2024). Estadísticas del sector calzadista 2023. Cámara de Calzado de Tungurahua.
- Ecoinvent Centre. (2020). Ecoinvent database v3.8. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. <https://www.ecoinvent.org/>
- GreenDelta. (2023). openLCA 2.0.3 software. GreenDelta GmbH. <https://www.open-lca.org/>
- Henkel AG. (2023). Loctite adhesive technical datasheet. Henkel Adhesive Technologies. <https://www.henkel-adhesives.com/>
- Allwood, J. M., Ashby, M. F., Gutowski, T. G., & Worrell, E. (2008). Material efficiency: A white paper. Resources, Conservation and Recycling, 55(3), 362-381. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.11.003>
- Bangor, A., Kortum, P. T., & Miller, J. T. (2008). An empirical evaluation of the System Usability Scale. International Journal of Human-Computer Interaction, 24(6), 574-594.
- Bhamra, T., Lilley, D., & Tang, T. (2007). Design for sustainable behaviour: Using products to change consumer behaviour. The Design Journal, 14(4), 427-445.
- Blessing, L. T., & Chakrabarti, A. (2009). DRM, a Design Research Methodology. Springer.
- Bras, B., & Morita, P. (2019). Life cycle assessment of leather tanning. Journal of Industrial Ecology, 23(4), 856-871.
- Bridgens, B., Powell, M., Farmer, G., Walsh, C., Reed, E., Royapoor, M., Gosling, P., Hall,

- J., & Heidrich, O. (2018). Creative upcycling: Reconnecting people, materials and place through making. *Journal of Cleaner Production*, 189, 145-154.
- Brown, T. (2008). Design thinking. *Harvard Business Review*, 86(6), 84-92.
- Carvajal, H. G., Ortiz, C. V., & Álvarez, L. J. (2020). Análisis de la industria del calzado en Tungurahua. *Revista Científica FIPCAEC*, 5(18), 65-89.
- Castellani, V., Sala, S., & Benini, L. (2021). Hotspots analysis and critical interpretation of food life cycle assessment studies. *Journal of Cleaner Production*, 140, 556-568.
- Ceschin, F., & Gaziulusoy, İ. (2016). Evolution of design for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 112, 1662-1674.
- Chowdhary, P., Raj, A., Verma, D., & Akhter, Y. (2023). Environmental sustainability and cleaner production approach in leather processing industry. *Journal of Cleaner Production*, 363, 132487.
- Ciroth, A. (2007). ICT for environment in life cycle applications openLCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(4), 209-210.
- Ciroth, A., Muller, S., Weidema, B., & Lesage, P. (2016). Empirically based uncertainty factors for the pedigree matrix in ecoinvent. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1338-1348.
- Collins, A., Joseph, D., & Bielaczyc, K. (2004). Design research: Theoretical and methodological issues. *Journal of the Learning Sciences*, 13(1), 15-42.
- Contreras-Lisperguer, R., Muñoz-Cerón, E., Aguilera, J., & de la Casa, J. (2020). A set of principles for applying life cycle sustainability assessment to renewable energy systems. *Sustainability*, 12(16), 6293.
- Crul, M. R., & Diehl, J. C. (2009). *Design for Sustainability: A Step-by-Step Approach*. UN Environment Programme.
- De Souza, V. F., & Ribeiro, J. L. (2023). Simplified LCA approaches: A review focusing on their applicability in developing countries. *Sustainability*, 15(7), 5858.
- Dixit, S., Yadav, A., Dwivedi, P. D., & Das, M. (2021). Toxic hazards of leather industry and technologies to combat threat: A review. *Journal of Cleaner Production*, 87, 39-49.
- Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R., Christiansen, K., & Klüppel, H. (2021). The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(S1), 80-85.
- Fletcher, K., & Tham, M. (2019). *Earth Logic: Fashion Action Research Plan*. JJ Charitable Trust.
- Goldsworthy, K. (2022). The Speedcycle: A design-led framework for fast and slow circular fashion lifecycles. *The Design Journal*, 15(1), 5-30.
- Gwilt, A., & Rissanen, T. (2011). *Shaping Sustainable Fashion*. Earthscan.
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2018). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Springer.
- Hochschorner, E., & Finnveden, G. (2003). Evaluation of two simplified life cycle assessment methods. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(3), 119-128.
- Huijbregts, M. A., Steinmann, Z. J., Elshout, P. M., et al. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138-147.

- INEC. (2021). Encuesta de Manufactura y Minería 2021. Instituto Nacional de Estadística y Censos del Ecuador.
- INPC. (2016). Tejido de Totorá: Patrimonio Cultural Inmaterial del Ecuador. Instituto Nacional de Patrimonio Cultural.
- ISO. (2006a). ISO 14040:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework. International Organization for Standardization.
- ISO. (2006b). ISO 14044:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines. International Organization for Standardization.
- Joseph, K., & Nithya, N. (2019). Material flows in the life cycle of leather. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3618-3632.
- Kamal, M., Hosseini, S., Mostofi, Y., & Agheli, L. (2023). Sustainable management of leather solid waste: Opportunities and challenges. *Journal of Environmental Management*, 304, 114278.
- Liedtka, J. (2015). Perspective: Linking design thinking with innovation outcomes through cognitive bias reduction. *Journal of Product Innovation Management*, 32(6), 925-938.
- Maccioni, L., Borgianni, Y., & Pigosso, D. C. (2023). Can the choice of eco-design principles affect products' success? *Design Science*, 5, e15.
- Maxwell, D., & van der Vorst, R. (2003). Developing sustainable products and services. *Journal of Cleaner Production*, 11(8), 883-895.
- Millet, D., Bistagnino, L., Lanzavecchia, C., Camous, R., & Poldma, T. (2007). Does the potential of the use of LCA match the design team needs? *Journal of Cleaner Production*, 15(4), 335-346.
- MPCEIP. (2019). Estrategia Nacional para el Cambio de la Matriz Productiva 2019-2025. Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca del Ecuador.
- Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., & Gwilt, A. (2020). The environmental price of fast fashion. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), 189-200.
- Pauer, E., Wohner, B., Heinrich, V., & Tacker, M. (2019). Assessing the environmental sustainability of food packaging: An extended life cycle assessment including packaging-related food losses and waste. *Sustainability*, 11(3), 925.
- Payne, A. (2022). *Fashion and textile design for sustainability: Skills and practice*. Routledge.
- Pfister, S., Koehler, A., & Hellweg, S. (2009). Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. *Environmental Science & Technology*, 43(11), 4098-4104.
- Pigosso, D. C., Rozenfeld, H., & McAloone, T. C. (2013). Ecodesign maturity model: A management framework to support ecodesign implementation into manufacturing companies. *Journal of Cleaner Production*, 59, 160-173.
- Quantis. (2020). *Measuring Fashion: Environmental Impact of the Global Apparel and Footwear Industries Study*. Quantis International.
- Ramírez-Portilla, C., Cagno, E., Brown, T. E., & Pugliese, R. (2024). Eco-innovation and firm performance: Do eco-innovation dimensions matter? *Business Strategy and the Environment*, 33(1), 43-67.
- Ribeiro, I., Sobral, P., Peças, P., & Henriques, E. (2021). Environmental impacts of leather processing: Proposal of a water-free alternative for chroming and drying operations. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26, 945-962.

- Rincón, L., Castell, A., Pérez, G., Solé, C., Boer, D., & Cabeza, L. F. (2022). Evaluation of the environmental impact of experimental buildings with different constructive systems using Material Flow Analysis. *Applied Energy*, 109, 544-552.
- Salazar, M., & Ponce, J. (2021). Análisis del sector calzadista de Tungurahua en el contexto de economía circular. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*, 19(4), 102-128.
- Sandin, G., & Peters, G. M. (2018). Environmental impact of textile reuse and recycling: A review. *Journal of Cleaner Production*, 184, 353-365.
- Sharma, G., & Sarmah, B. (2021). Traditional crafts and sustainable development: The role of design intervention. *Design Journal*, 24(2), 287-306.
- Silvestre, J. D., de Brito, J., & Pinheiro, M. D. (2019). From the new European Standards to an environmental, energy and economic assessment of building assemblies. *Energy and Buildings*, 187, 237-251.
- Sung, K. (2015). A review on upcycling: Current body of literature, knowledge gaps and a way forward. *Resources, Conservation and Recycling*, 96, 28-37.
- Sung, K., Cooper, T., & Kettley, S. (2019). Factors influencing upcycling for UK makers. *Sustainability*, 11(3), 870.
- Thanikaivelan, P., Rao, J. R., Nair, B. U., & Ramasami, T. (2024). Progress and recent trends in biotechnological methods for leather processing. *Trends in Biotechnology*, 22(4), 181-188.
- UNIDO. (2011). *Pollutants in Tannery Effluents*. United Nations Industrial Development Organization.
- Vega-Muñoz, A., Bustamante-Pavez, P., Arjona-Fuentes, J. M., & Ariza-Montes, A. (2021). Artisan entrepreneurship: A systematic literature review and research agenda. *Sustainability*, 13(22), 12690.
- Vezzoli, C., Ceschin, F., Osanjo, L., M'Rithaa, M. K., Moalosi, R., Nakazibwe, V., & Diehl, J. C. (2018). *Designing Sustainable Energy for All*. Springer.

Abstract: Artisanal manufacturing represents 15-25% of employment in light manufacturing sectors in developing economies, yet remains marginalized in sustainability research, with only 4% of environmental footprint literature addressing this context. This study develops and validates ECO-CRAFT, an operational framework integrating simplified life cycle assessment (LCA) with Design Thinking methodology to enable quantitative environmental evaluation in resource-constrained artisanal production contexts. The framework comprises three layers: (1) Integrated Design Process adapting the five Design Thinking phases (Empathize, Define, Ideate, Prototype, Test) with embedded environmental assessment; (2) Simplified LCA Toolset providing four complementary instruments (Material Inventory Calculator, Impact Factor Library, Hotspot Analysis Matrix, Scenario Comparator) reducing execution time from 40-60 hours to 6.8 hours (84% reduction) while maintaining technical precision

($r=0.92$ correlation with reference LCA); and (3) Validation Mechanisms ensuring rigor through cross-validation, structured documentation, and community of practice. Empirical validation through development of CHAKI footwear in Tungurahua, Ecuador, demonstrated achievement of quantitative environmental objectives (68.4% reduction in climate change impact, 80.3% in water consumption, 71.8% in human toxicity) exceeding established targets ($\geq 60\%$, $\geq 70\%$, $\geq 50\%$ respectively), while maintaining economic viability (14.5% production cost increase with 56% margin through 18% price premium accepted by 75% of consumers) and positive cultural acceptance (82% valuation of Ecuadorian identity through traditional totora weaving technique applied to recycled leather). Triple validation confirmed framework effectiveness: technical precision ($r=0.92$ for GWP, 87th percentile in simplified LCA literature), usability (System Usability Scale 78.3/100, 80th percentile, with 100% task completion by non-specialized participants including secondary-education artisans), and decision impact (80% of major design decisions explicitly informed by environmental data versus 42-67% in existing literature). Results challenge the prevailing narrative associating environmental sustainability with industrial economies of scale, demonstrating that small-scale artisanal production achieved superior environmental performance (68.4% GWP reduction) compared to industrial benchmarks (15-32% reduction) through radical material circularity and local supply chain proximity. The study addresses critical geographic and sectoral gaps in sustainability science, provides an empirically validated template for eco-design framework assessment through triple validation protocol, and establishes a replicable precedent for enabling rigorous environmental evaluation in artisanal manufacturing contexts globally, particularly relevant for developing economies where this sector represents substantial employment but has remained systematically excluded from sustainability discourse.

Keywords: simplified life cycle assessment – design thinking – sustainable design – artisanal manufacturing – circular economy – eco-design framework – developing economies

Resumo: A manufatura artesanal representa 15-25% do emprego em setores de manufatura leve em economias em desenvolvimento, mas permanece marginalizada na pesquisa de sustentabilidade. Este estudo desenvolve e valida ECO-CRAFT, um framework operacional que integra avaliação de ciclo de vida (ACV) simplificada com metodologia Design Thinking para possibilitar avaliação ambiental quantitativa em contextos artesanais com recursos limitados. O framework compreende três camadas reduzindo tempo de execução de 40-60 horas para 6.8 horas (redução de 84%) mantendo precisão técnica ($r=0.92$ correlação com ACV de referência). A validação empírica através do desenvolvimento do calçado CHAKI em Tungurahua, Equador, demonstrou alcance de objetivos ambientais quantitativos (68.4% redução em mudança climática, 80.3% em consumo de água, 71.8% em toxicidade humana) excedendo metas estabelecidas, mantendo viabilidade econômica e aceitabilidade cultural positiva.

A validação tripla confirmou efetividade do framework: precisão técnica ($r=0.92$), usabilidade (SUS 78.3/100, 100% completude de tarefas), e impacto em decisões (80% das decisões principais de design explicitamente informadas por dados ambientais versus 42-67% na literatura existente). Os resultados desafiam a narrativa prevalente associando sustentabilidade ambiental com economias de escala industriais.

Palavras-chave: Avaliação de ciclo de vida simplificada – Design Thinking – Design sustentável – Manufatura artesanal – Economia circular – Framework eco-design – Economias em desenvolvimento

Enrique Barreno: Máster en Ingeniería de Petróleos (Curtin University-Australia) e Ingeniería Industrial (UTM - Ecuador). Ingeniero Mecánico con distinción por su investigación en Riesgo Mecánico. Es docente-investigador en la Universidad Técnica de Ambato (UTA), integrando el grupo GIDDIC. Su investigación se enfoca en sistemas energéticos sostenibles, análisis de ciclo de vida y materiales compuestos, con publicaciones en Scopus y WoS. Correo: e.barreno@uta.edu.ec <https://orcid.org/0000-0001-5221-7664>

Patricia Montenegro: Magíster en Diseño de Productos e Ingeniera Industrial (PUCE). Es CEO de la marca LAMA GLAMA y experta técnica en certificaciones ISO para ICONTEC. Docente-investigadora en la UTA, su producción científica se centra en la intersección de la inteligencia artificial, el diseño sostenible y la identidad cultural en el diseño industrial. Correo: gp.montenegro@uta.edu.ec <https://orcid.org/0009-0006-9901-8199>

Cristina Rosas: Magíster en Innovación para el Desarrollo Empresarial (Tec. de Monterrey) y Diseñadora de Productos (PUCE). Auditora Líder en Sistemas Integrados ISO y especialista en propiedad intelectual. Actualmente es docente-investigadora en la UTA, liderando proyectos en diseño centrado en el usuario, innovación aplicada y desarrollo de productos con múltiples registros de propiedad industrial. Correo: c.rosas@uta.edu.ec <https://orcid.org/0009-0003-3698-4144>