

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

Oportunidades de implementación de herramientas *Lean* en el sector panelero: un estudio de caso múltiple en la provincia de Guantán, Santander.

Mariana Cuartas Díaz y Miguel Angel Durán Páez

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Industrial

Director

Juan Felipe Reyes Rodríguez

PhD en Administración

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

Septiembre, 2024

Dedicatoria

En primer lugar, a Dios, porque siempre me escuchó y me dio la fortaleza que necesité en cada paso de este camino.

A mí misma, por demostrarme que por fin la palabra "algún día", se convirtió en "finalmente".

A mi familia, especialmente a mi mamá, por sus palabras de aliento; a mi papá, por animarme siempre a superarme; a mi abue Bleo, por acompañarme siempre en cada una de mis etapas; y a mis hermanas menores, por contagiarme de su brillo y llenarme de risas en momentos difíciles.

A mi amor más grande, mi abuelo Cabe, quien me acompaña desde el cielo, por su amor incondicional que siento siempre pegadito a mi corazón.

A mi compañero de tesis, el más inteligente, quien siempre me dio ánimo cuando más lo necesitaba, escuchó mis frustraciones y me enseñó el valor de la perseverancia.

Mariana Cuartas Díaz

Dedico este trabajo principalmente a Dios, guía y motivación de mi vida.

A mi familia: Efraín, Bárbara, Jennifer, y mis queridas sobrinas, Mía y Malú, quienes son mi consuelo y el mejor ejemplo de amor incondicional.

Finalmente, a mi compañera de tesis, una fuente inagotable de creatividad e inspiración, que siempre creyó en mí y en el potencial de este proyecto.

Miguel Angel Durán Páez

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander por brindarme la formación y las herramientas necesarias para alcanzar esta meta. A nuestro director, Juan Felipe Reyes, por su invaluable orientación, paciencia y compromiso a lo largo de todo el proceso. Agradezco también a todos los productores que nos abrieron las puertas de sus empresas, permitiendo que este proyecto cobrara vida, especialmente a Don Ramiro, por su generosidad y disposición. Finalmente, un agradecimiento especial a Sam Altman.

Mariana Cuartas Díaz

Al concluir esta etapa maravillosa de mi vida quiero extender un sincero agradecimiento a quienes hicieron posible este trabajo, aquellos que siempre confiaron en mi potencial y me brindaron su compañía física y emocional. Esta mención especial es para Dios en primer lugar, para mi familia, mis compañeros de carrera y todas las personas con las que compartí alegrías y angustias durante estos cinco años de aprendizaje.

Mi más profunda gratitud a nuestro director de tesis, Juan Felipe Reyes, por compartir su sabiduría y guiarnos en el arduo camino de la investigación. Agradezco también a la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales (EEIE), por formar profesionales íntegros desde la experiencia y conocimientos de su prestigioso cuerpo de docentes; A la Universidad Industrial de Santander, por su constante compromiso con el desarrollo de nuestro país y por brindar las herramientas necesarias para que personas como yo puedan acceder a una educación de alta calidad. Finalmente, agradecerle a don Ramiro Arenas, un dedicado productor de panela y amante del agro, quien generosamente nos proporcionó la información y los contactos necesarios para llevar a cabo este proyecto.

Miguel Angel Durán Páez

Contenido

Introducción	11
Tabla de Cumplimiento de Objetivos	13
1. Planteamiento del Problema	14
2. Justificación	16
3. Objetivos	19
3.1 Objetivo General	19
3.2 Objetivos Específicos.....	19
4. Revisión de la Literatura.....	20
4.1 Análisis Bibliométrico	20
4.2 Análisis de la Literatura	24
4.2.1 Industria 4.0 y Tecnologías de la Información	25
4.2.2 Modelos de Decisión y Selección de Herramientas Lean.....	27
4.2.3 Impacto Sostenible de la Adopción de Sistemas Lean	29
5. Marco Teórico.....	33
5.1 <i>Lean Management</i>	33
5.1.1 Lean Tools	35
5.2 Operaciones Sostenibles	36
5.3 <i>Lean-Green</i>	37
6. Metodología	39
6.1 Fase 1: Recopilación de Herramientas <i>Lean</i> Descritas en la Literatura	39
6.2 Fase 2: Reconocimiento del Contexto Productivo, Métodos, Tecnologías, y Recursos Utilizados Para la Fabricación de Panela en el País y en la Provincia de Guantáná	40
6.3 Fase 3: Análisis de Resultados y Socialización de Oportunidades de Mejora	41

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

6.4 Fase 4: Elaboración del Artículo Publicable.....	42
6.5 Descripción de la Muestra	43
7. Resultados.....	45
7.1 Caracterización del Sector Panelero	45
7.1.1 Cultivo.....	45
7.1.2 Cosecha.....	48
7.1.3 Post Cosecha	50
7.1.4 Producción de panela	53
7.2 Principales Problemáticas del Sector	68
7.2.1 Uso Inadecuado de los Recursos Naturales	70
7.2.2 Gestión Ineficiente de los Residuos.....	72
7.2.3 Condiciones Laborales Desafiantes	75
7.2.4 Falta de Estandarización de Procesos	77
7.3 Oportunidades de Implementación de Herramientas <i>Lean</i>	79
7.3.1 Herramientas Lean de Aplicación Transversal	79
7.3.2 Herramientas Lean de Aplicación Específica	85
7.4 Diseño de una guía de implementación de herramientas <i>Lean</i> en el sector panelero.....	101
Recomendaciones	105
Referencias Bibliográficas	106

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Palabras clave por categoría</i>	20
Tabla 2. <i>Definición de herramientas Lean</i>	35
Tabla 3. <i>Características de las unidades productivas en el caso de estudio</i>	43
Tabla 4. <i>Altitud del terreno y tiempo de maduración de la caña</i>	47
Tabla 5. <i>Características de las tecnologías de corte</i>	49
Tabla 6. <i>Datos para VSM</i>	66
Tabla 7. <i>Herramientas Lean asociadas a las problemáticas</i>	98

Lista de figuras

Figura 1. <i>Producción científica anual con la temática a estudiar</i>	22
Figura 2. <i>Interrelación de palabras clave</i>	23
Figura 3. <i>Variedad y cultivo de caña</i>	48
Figura 4. <i>Transporte de caña</i>	50
Figura 5. <i>Abastecimiento de caña de la zona de apronte a la zona de molienda</i>	52
Figura 6. <i>Proceso productivo de la panela</i>	54
Figura 7. <i>Molienda de la caña</i>	55
Figura 8. <i>Dispositivo de prelimpieza</i>	58
Figura 9. <i>Proceso de clarificación</i>	59
Figura 10. <i>Línea de fondos</i>	60
Figura 11. <i>Batido y moldeo</i>	63
Figura 12. <i>Proceso de almacenamiento</i>	64
Figura 13. <i>Árbol del problema sector panelero</i>	69
Figura 14. <i>Uso de agua en el proceso de moldeo</i>	71
Figura 15. <i>Flujo de vapor</i>	73
Figura 16. <i>Aguas residuales</i>	74
Figura 17. <i>Flujo de emisiones</i>	75
Figura 18. <i>Posturas inadecuadas</i>	76
Figura 19. <i>Boceto mesa con depósito</i>	87
Figura 20. <i>Dispositivo de control de arvenses</i>	90
Figura 21. <i>Dispositivo de transporte por gravedad</i>	94
Figura 22. <i>Dispositivo Poka-Yoke</i>	96

Lista de apéndices

Ver apéndices adjuntos, pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS

Apéndice A. *Entrevistas con los productores*

Apéndice B. *Guía de Implementación de HL*

Apéndice C. *Value Stream Mapping*

Apéndice D. *Socialización con Productores*

Apéndice E. *Artículo publicable*

Resumen

Título: Oportunidades de implementación de herramientas *Lean* en el sector panelero: un estudio de caso múltiple en la provincia de Guantán, Santander.¹

Autores: Mariana Cuartas Díaz, Miguel Angel Durán Páez²

Palabras clave: Herramientas *Lean*, sostenibilidad, productividad, industria panelera, provincia de Guantán.

Descripción: La panela, derivada de la caña de azúcar, es fundamental en la economía agrícola de Colombia, constituyendo la segunda agroindustria más importante del país y sustentando a numerosas comunidades rurales, especialmente en departamentos como Santander. A pesar de su relevancia, el sector enfrenta serios desafíos de productividad y sostenibilidad. Este estudio investiga las oportunidades de implementación de herramientas *Lean* para mejorar la productividad y promover prácticas sostenibles en el sector panelero de la provincia de Guantán, Santander. Empleando una metodología mixta y un enfoque de estudio de caso múltiple en cinco unidades productivas, se recopiló información sobre la adopción de herramientas *Lean* que han demostrado un impacto favorable en la sostenibilidad. Estos datos, complementados con observaciones directas y entrevistas no estructuradas con los productores, permitieron la elaboración de una guía práctica para la implementación de herramientas *Lean* que, posteriormente, fue compartida con los participantes del estudio. Los resultados identificaron desafíos clave para el sector, incluyendo la falta de modernización en los procesos productivos, la baja adopción de tecnología, y deficiencias en la organización y la gestión de recursos. También se detectaron brechas en el acceso a mercados más amplios y en la implementación de medidas para asegurar la calidad e inocuidad de los productos. Con base en estos hallazgos, se desarrolló la guía de implementación de herramientas *Lean*, adaptada a las necesidades del sector panelero. La guía recomienda la adopción de prácticas como 5S's, *Value Stream Mapping*, *Poka-Yoke* y *Kaizen*, enfocadas en mejorar la organización, estandarizar procesos, reducir defectos, proteger a los empleados y fomentar una cultura de mejora continua. La implementación de estas herramientas *Lean* tiene el potencial de transformar los procesos productivos, aumentar la eficiencia operativa y promover una sostenibilidad duradera, fortaleciendo así la competitividad del sector panelero y su impacto en la economía de Guantán y Colombia.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director Juan Felipe Reyes Rodríguez. PhD en administración.

Abstract

Title: Opportunities for Implementing Lean Tools in the Panela Sector: A Multiple Case Study in the Province of Guantán, Santander.¹

Authors: Mariana Cuartas Díaz, Miguel Angel Durán Páez²

Keywords: Lean tools, sustainability, productivity, panela industry, Guantán province.

Description: Panela, derived from sugarcane, is crucial to Colombia's agricultural economy, constituting the country's second most important agro-industry and sustaining numerous rural communities, especially in departments like Santander. Despite its significance, the sector faces serious challenges in productivity and sustainability. This study explores the opportunities for implementing Lean tools to enhance productivity and promote sustainable practices in the panela sector in the province of Guantán, Santander. Using a mixed methodology and a multiple case study approach in five production units, information was collected on the adoption of Lean tools that have demonstrated a favorable impact on sustainability. These data, supplemented by direct observations and unstructured interviews with producers, facilitated the development of a practical guide for implementing Lean tools, which was subsequently shared with the study participants. The results identified key challenges for the sector, including a lack of modernization in production processes, low adoption of technology, and deficiencies in organization and resource management. Additionally, gaps were detected in access to broader markets and in the implementation of measures to ensure product quality and safety. Based on these findings, a Lean tool implementation guide was developed, tailored to the needs of the panela sector. The guide recommends the adoption of practices such as 5S's, Value Stream Mapping, *Poka-Yoke*, and *Kaizen*, focused on improving organization, standardizing processes, reducing defects, protecting employees, and fostering a culture of continuous improvement. The implementation of these Lean tools has the potential to transform production processes, increase operational efficiency, and promote long-term sustainability, thereby strengthening the competitiveness of the panela sector and its impact on the economy of Guantán and Colombia.

¹ Degree project

² Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Industrial and Business Studies. Director Juan Felipe Reyes Rodríguez. PhD in Management.

Introducción

En el contexto global actual, donde la sostenibilidad se ha convertido en el principio rector y objetivo fundamental de la industria, la implementación de prácticas *Lean* tiene el potencial para responder a esta necesidad. Esto se debe a que la filosofía *Lean*, al enfocarse en la eliminación de desperdicios, no solo mejora la calidad y productividad, sino que también fortalece el desempeño sostenible de las empresas teniendo presente el cuidado del medio ambiente (Musa y Alwan, 2024). Como lo afirman Dües et al. (2013), un entorno *Lean* actúa como catalizador para que las empresas adopten prácticas más sostenibles, integrando de manera efectiva la triple relación esencial que deben perseguir: lo económico, lo social y lo ambiental. Este proyecto tiene como objetivo principal identificar oportunidades de implementación de herramientas *Lean* que mejoren la productividad y promuevan prácticas sostenibles en el sector panelero de la provincia Guantán, Santander.

La cadena de suministro de la producción de panela representa un importante sector de la economía local, caracterizado por su relevancia en la generación de empleo y su impacto en el desarrollo regional. Sin embargo, este sector enfrenta desafíos relacionados con la eficiencia de los recursos, la gestión de residuos y la sostenibilidad ambiental, que pueden abordarse de manera efectiva mediante la implementación de prácticas *Lean*.

Para alcanzar este objetivo, el proyecto se estructura en cuatro fases: reconocimiento de herramientas *Lean*, análisis del contexto productivo de la panela a nivel nacional y provincial, socialización de oportunidades de mejora mediante la implementación de dichas herramientas y, finalmente, la elaboración de un artículo publicable que resuma los hallazgos y recomendaciones del estudio.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

A través de este proyecto, se espera identificar áreas de oportunidad para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en los eslabones de abastecimiento y transformación de la cadena de suministro de la producción de panela, promoviendo prácticas responsables y sostenibles que contribuyan al desarrollo económico y social de la región, al mismo tiempo que se reducen los impactos ambientales asociados a estas actividades productivas.

A lo largo del estudio, este documento aborda las problemáticas, métodos y soluciones relacionadas con la sostenibilidad del sector productivo de panela, mediante diferentes secciones que, en conjunto, conforman el núcleo de la investigación. Tras esta introducción, se encuentran el planteamiento del problema y la justificación, en donde se describe la problemática principal y se ratifica la importancia de adelantar este estudio. Posteriormente, se presentan los objetivos y la revisión de literatura, en donde se definen las metas y el alcance de la investigación, y se estudia la producción científica en torno al tema. Más adelante están el marco teórico y la metodología, en donde se definen los conceptos técnicos y se describen los detalles sobre el método de investigación empleado. A continuación, se encuentran los resultados y observaciones, en donde se resaltan los hallazgos con base en los objetivos y se manifiestan opiniones respecto a puntos neurálgicos del estudio. Ya para finalizar, se encuentran las conclusiones y otras líneas de investigación, en donde se destacan los datos más importantes producto de los resultados y se sugieren temas de interés para futuras investigaciones. Por último, se encuentra la sección de referencias, en donde se relacionan las fuentes que respaldan la validez de la información aquí consignada.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

Tabla de Cumplimiento de Objetivos

Objetivo	Cumplimiento
Identificar herramientas <i>Lean</i> descritas en la literatura que han tenido aplicaciones efectivas y resultados favorables en productividad y sostenibilidad.	<p style="text-align: center;">4. Revisión de la Literatura 5. Marco Teórico</p>
Describir las etapas del proceso, tecnologías utilizadas y factores ambientales inmersos en el abastecimiento y producción de panela.	<p style="text-align: center;">7.1 Caracterización del Sector Panelero</p>
Caracterizar las etapas del proceso, tecnologías utilizadas y factores ambientales del sector productivo de panela en la provincia de Guantán, Santander.	<p style="text-align: center;">7.2 Principales Problemáticas del Sector</p>
Proponer recomendaciones para los productores de panela participantes en el estudio, fundamentadas en la aplicabilidad de herramientas <i>Lean</i> , con el fin de incrementar la productividad y fomentar prácticas sostenibles en sus procesos de producción.	<p style="text-align: center;">7.3 Oportunidades de Implementación de Herramientas <i>Lean</i> 7.4 Diseño de una guía de implementación de herramientas <i>Lean</i> en el sector panelero Apéndice D. Socialización con Productores</p>
Elaborar un artículo publicable en el que se documenten los hallazgos, conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación realizada.	<p style="text-align: center;">Apéndice A. Artículo publicable</p>

1. Planteamiento del Problema

La industria de la panela en Colombia se enfrenta actualmente a grandes desafíos inherentes al sector agrícola en sí mismo, por un lado, la preocupación y el esfuerzo constante por ser más productivo y rentable (Barth y Melin, 2018) y, por otro lado, la globalización, que “obliga a los productores que deseen permanecer en el mercado a reducir costos y a ser responsables social y ambientalmente” (Ordoñez y Rueda, 2017, p.381). Ante estas circunstancias, surge la necesidad de búsqueda de estrategias que faciliten a los agricultores o pequeños productores del sector, la identificación de técnicas que, tal como lo sugieren Barth y Melin (2018), les permitan mejorar la producción e incrementar sus utilidades, al tiempo que se promueve la sostenibilidad ambiental.

Con el objetivo de abordar estos dos puntos, surge entonces la integración de herramientas *Lean* que apuntan a la sostenibilidad, que se define como la eliminación de pasos o procesos que no aportan valor agregado desde la perspectiva de eficiencia y de conciencia medioambiental (Leong et al., 2019). En otras palabras, esto se traduce en la optimización de los procesos productivos para reducir el desperdicio de recursos, minimizar la generación de residuos y mejorar la sostenibilidad global de las operaciones industriales, lo que podría manifestarse como una solución acertada para las problemáticas anteriormente planteadas.

En el estudio de Rodríguez (2010), que aborda la problemática y los nuevos retos de la agroindustria rural de la panela, se destaca que el sector panelero enfrenta desafíos significativos tanto en producción como en comercialización. En términos de producción, la dificultad para controlar plagas y un sistema diseñado para una baja escala productiva resultan en costos excesivos que ponen en riesgo la perdurabilidad del sector. En cuanto al mercado, la falta de coordinación entre las regiones paneleras, para la planificación de la producción y comercialización, aumenta la

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

volatilidad de los precios, afectando directamente la competitividad de los productores frente a productos sustitutos como el azúcar. Aunque este estudio se publicó hace más de una década, esta realidad sigue siendo muy relevante. El Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) lo reconoce en 2024 al firmar un acuerdo para el sector panelero del país, cuyo objetivo principal es “mejorar el manejo de plagas, promover prácticas agrícolas sostenibles y fortalecer la competitividad de la panela colombiana”.

De acuerdo con lo anterior, resulta adecuado afirmar que los productores de panela necesitan identificar nuevas herramientas o enfoques que les permitan comprender cómo es que sus procesos están contribuyendo a afrontar los desafíos de productividad y rentabilidad, así como a cumplir con los estándares sociales y ambientales exigidos por el mercado globalizado.

Para el sector productivo de panela en Colombia, el “Manual técnico de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) y Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) en la producción de caña y panela” es el recurso disponible más cercano a la propuesta del proyecto. Dicho manual establece buenas prácticas para el cultivo de caña de azúcar, describiendo detalladamente las etapas del cultivo, los insumos necesarios, y los procedimientos adecuados para la fertilización y el control de plagas. Además, ofrece una visión general del proceso de producción de panela y presenta las diferentes BPM recomendadas para cada fase del proceso. Sin duda, este trabajo puede ser de gran utilidad en esta investigación, ya que proporciona datos representativos del sector a partir de fuentes verificables, sin embargo, no aborda específicamente los aspectos de eficiencia que son centrales en el enfoque *Lean*, de manera que se evidencia una brecha en la disponibilidad de herramientas adecuadas para la identificación de prácticas que integren la eficiencia operativa y la sostenibilidad ambiental en la industria panelera.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

En este contexto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿cuáles son las herramientas *Lean* más adecuadas para mejorar la productividad y promover prácticas sostenibles en el sector panelero de la provincia de Guanentá, Santander?

2. Justificación

En la actualidad, la panela, como producto derivado de la caña de azúcar, está ganando cada vez más relevancia dentro de la agroindustria a nivel internacional, por lo que, al considerar la importancia económica y social de este sector, es crucial garantizar su crecimiento sostenible y su contribución al bienestar de las regiones que se favorecen de él. En este sentido, se plantea desarrollar este proyecto de investigación justificado bajo el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente el octavo, el noveno y el duodécimo, que corresponden a trabajo decente y crecimiento económico; industria, innovación e infraestructura; y producción y consumo responsable, respectivamente.

Con respecto al octavo ODS, este proyecto busca sentar las bases para mejorar la eficiencia y competitividad del sector panelero de Santander a través de la alfabetización en técnicas *Lean-Green* que favorezcan la eficiencia operativa de unidades productivas, específicamente, en la provincia de Guanentá. Adicionalmente, con relación al noveno ODS, se pretende facilitar la identificación de áreas de mejora en los procesos correspondientes a los eslabones de abastecimiento y transformación de manera que se promueva la innovación en la gestión de la cadena de suministro. Por último, en cuanto al duodécimo ODS, el proyecto busca proponer una serie de herramientas que fomenten la adopción de prácticas sostenibles en los procesos de transformación de este sector productivo, con el fin de incentivar la producción responsable.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

En lo que respecta a la relevancia de este sector en Colombia frente a otros países productores, se encontró que, según datos obtenidos a través de la plataforma Legis Comex (2022), Colombia se sitúa como el segundo mayor productor de panela a nivel mundial, alcanzando una producción aproximada de 1,2 millones de toneladas al año, lo que representa el 16% de lo producido en todo el mundo. Dada la importancia de esta industria en la economía nacional y su posición destacada en el mercado global, se hacen significativos los esfuerzos por mejorar la eficiencia y sostenibilidad apuntando a favorecer al sector y ser ejemplo replicable en, incluso, otros sectores agroindustriales.

Dentro del marco del Plan Nacional de Desarrollo de Colombia (PND) 2022-2026, específicamente en la sección "Modelos de Bioeconomía Basada en el Conocimiento y la Innovación", es posible evidenciar que en el país ya existe una clara preocupación por impulsar la implementación de estrategias de producción sostenible y modelos regenerativos en la agricultura. En este contexto, el PND propone la adopción de una ley de agroecología como medida para preservar los recursos naturales y aumentar la productividad, al mismo tiempo que se efectúa la transición del modelo agrícola tradicional hacia uno más ecológico. A través de este proyecto, se aspira a contribuir al cumplimiento de estos objetivos, proporcionándoles a los agricultores una oportunidad de identificar áreas de mejora, de modo que sus procesos se alineen a la propuesta de la Agenda Nacional.

El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MinAgricultura) ubica a la agroindustria panelera como la segunda de mayor importancia social en el país, después del café (Semana, 2020). Esto debido a que, no solo aporta en un 3% al PIB agro, sino que también genera más de 375.000 empleos directos y 755.000 empleos indirectos (Sistema de Información Panelero

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

(SIPA), 2021). Es en este contexto en donde el departamento de Santander se configura como una de las regiones líderes en la producción de este importante producto a nivel nacional, con una producción anual que supera las 155.000 toneladas métricas (MinAgricultura, 2020), de las cuales, alrededor de 50.000 son producidas en la provincia de Guanentá (SIPA, 2022), lo que la convierte en un lugar estratégico para incursionar en la investigación de nuevas prácticas y tecnologías en la gestión de la cadena de suministro panelera.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se puede afirmar entonces que realizar este proyecto es fundamental para empezar a construir una ruta para el mejoramiento de factores de eficiencia y sostenibilidad en la agroindustria de la panela en Colombia, impactando positivamente a los productores del sector y al desarrollo económico y social de la región, al tiempo que se contribuye al avance del conocimiento y las prácticas verdes en el campo de la gestión de la cadena de suministro del sector agro.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Determinar oportunidades de implementación de herramientas *Lean* que mejoren la productividad y promuevan prácticas sostenibles en el sector panelero de la provincia de Guantán, Santander.

3.2 Objetivos Específicos

Identificar herramientas *Lean* descritas en la literatura que han tenido aplicaciones efectivas y resultados favorables en productividad y sostenibilidad.

Describir las etapas del proceso, tecnologías utilizadas y factores ambientales inmersos en el abastecimiento y producción de panela.

Caracterizar las etapas del proceso, tecnologías utilizadas y factores ambientales del sector productivo de panela en la provincia de Guantán, Santander.

Proponer recomendaciones para los productores de panela participantes en el estudio, fundamentadas en la aplicabilidad de herramientas *Lean*, con el fin de incrementar la productividad y fomentar prácticas sostenibles en sus procesos de producción.

Elaborar un artículo publicable en el que se documenten los hallazgos, conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación realizada.

4. Revisión de la Literatura

4.1 Análisis Bibliométrico

De acuerdo con los objetivos del proyecto, en este apartado se presentan algunos elementos bibliométricos de la literatura sobre la integración de los conceptos *Lean*, *Green* y productividad.

Para la búsqueda se construyó la Tabla 1 empleando tres conjuntos de palabras clave cuidadosamente seleccionados para refinar el alcance a los artículos de investigación relevantes.

Tabla 1

Palabras clave por categoría

<i>Lean</i>	<i>Green</i>	<i>Productivity</i>
<i>Lean philosophy</i>	<i>Sustainable</i>	<i>Efficiency</i>
<i>Lean farming</i>	<i>Eco</i>	<i>Optimization</i>
<i>Lean production</i>	<i>Ecological</i>	<i>Performance</i>
<i>Lean manufacturing</i>	<i>Environmental awareness</i>	<i>Automation</i>
<i>Lean thinking</i>	<i>Eco- friendly</i>	<i>Continuous improvement</i>
<i>Lean transformation</i>	<i>Environmentally conscious</i>	<i>Effectiveness</i>
<i>Lean-Green</i>	<i>Responsible</i>	
<i>Lean tools</i>	<i>Clean</i>	

Posteriormente, utilizando los conectores *AND* y *OR* en función de la relación entre los términos, se estableció la siguiente ecuación de búsqueda:

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

("Lean" OR "Lean philosophy" OR "Lean production" OR "Lean manufacturing" OR "Lean thinking" OR "Lean transformation" OR "Lean Green" OR "Lean tools") AND ("Green" OR "Sustainable" OR "Eco" OR "Ecological" OR "Environmental awareness" OR "Eco friendly" OR "Environmentally conscious" OR "Responsible" OR "Clean") AND ("Efficiency" OR "Optimization" OR "Performance" OR "Automation" OR "Continuous improvement" OR "Effectiveness")

Con la ecuación obtenida, se procedió a realizar la búsqueda en la base de datos académica Scopus, donde inicialmente se obtuvo un resultado de 3.466 publicaciones.

Con el propósito de optimizar la búsqueda, como primera actividad de exclusión se decidió aplicar tres filtros. En primer lugar, se limitó la selección a publicaciones realizadas entre 2020 y 2024, obteniendo un resultado de 1.576 estudios en la plataforma seleccionada; en segunda instancia, se aplicó un filtro de tipo de publicación, mediante el cual se seleccionaron exclusivamente estudios de tipo artículo de investigación, con un resultado de 933 artículos; finalmente, se redujo la muestra a 407 documentos, a través del filtro de artículos de acceso abierto.

Como segunda actividad de exclusión, se optó por no tener en cuenta los artículos en las categorías de Veterinaria, Farmacología, Profesiones de la Salud, Bioquímica y Neurología. De esta manera, se obtuvo una muestra parcial de 309 artículos.

Finalmente, para mejorar la especificidad de la búsqueda, se realizó un método manual de exclusión. Uno por uno, se revisaron títulos y resúmenes de los trabajos publicados, procedimiento en el cual se descartaron 138 publicaciones por su incompatibilidad con el proyecto, obteniendo entonces un total de 171 artículos.

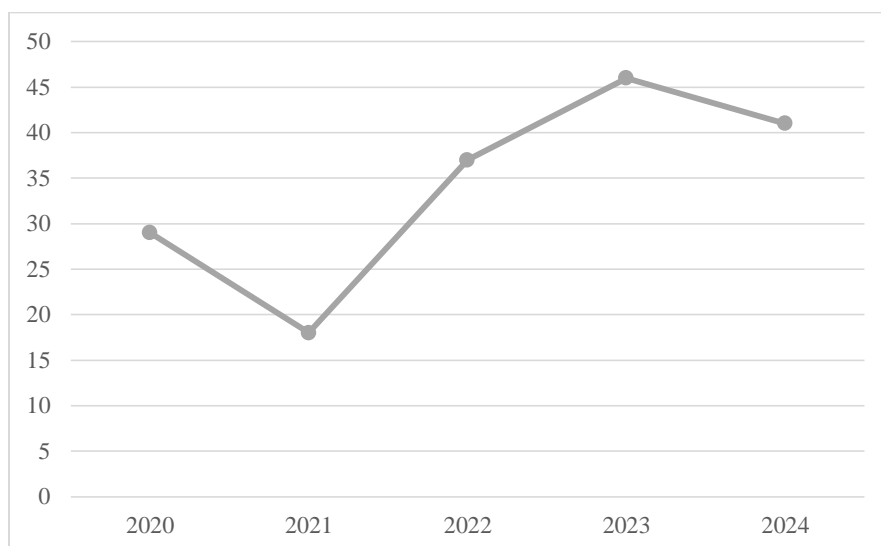
HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

De esta manera, a continuación, se estudian las características bibliométricas de la muestra final de artículos.

En la Figura 1 se plasma la producción anual de artículos científicos publicados en la base de datos Scopus con relación a las temáticas planteadas.

Figura 1

Producción científica anual con la temática a estudiar



La gráfica refleja la evolución del número de publicaciones anuales desde 2020 hasta 2024. En el extremo inferior, la producción académica fue relativamente baja, alcanzando su punto más bajo en 2021, con menos de 20 publicaciones. A partir de 2022, se observa un cambio positivo, con un aumento significativo en el número de publicaciones. Este crecimiento continuó en 2023, año en el que se registró el punto más alto hasta el momento, con cerca de 45 publicaciones. Finalmente, en 2024, aunque se observa una ligera disminución, la producción sigue siendo alta y podría acercarse a los niveles del año anterior.

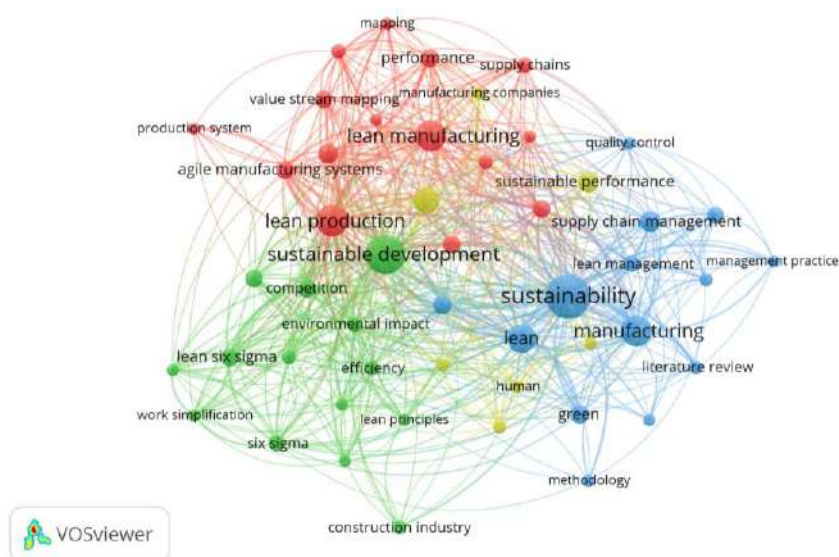
HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

Este patrón sugiere que, tras una caída inicial, ha habido un fuerte repunte en la actividad de publicaciones, lo que indica un creciente interés o desarrollo en el área de estudio.

La Figura 2 ilustra la interrelación de palabras clave en dos o más estudios para los artículos encontrados en Scopus.

Figura 2

Interrelación de palabras clave



La gráfica generada por VOSviewer plasma una red de palabras clave extraídas de información bibliométrica correspondiente a la muestra de artículos seleccionada, destacando aquellas que se mencionaron al menos cinco veces. Esta representación visual organiza las palabras clave en distintos clústeres identificados por colores, que revelan las principales áreas de enfoque en la literatura analizada.

Uno de los clústeres más destacados, identificado con el color rojo, está centrado en la manufactura *Lean*, donde términos como “*lean production*”, “*lean manufacturing*”, “*value stream*

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

mapping” y *“agile manufacturing systems”* son predominantes. Esto indica un enfoque significativo en métodos y sistemas de producción ágiles y eficientes.

Otro clúster importante, identificado con el color verde, se enfoca en la producción sostenible y el desarrollo sostenible. Aquí, palabras clave como *“environmental impact”*, *“lean six sigma”* y *“efficiency”* sugieren una fuerte relación entre la manufactura *Lean* y las prácticas sostenibles, evidenciando cómo las herramientas *Lean* pueden contribuir al logro de objetivos ambientales.

El clúster en azul se concentra en términos como *“sustainability”*, *“supply chain management”* y *“manufacturing”*, lo que refleja la creciente integración de prácticas sostenibles en la gestión y operación de la cadena de suministro, un aspecto crucial para la implementación de prácticas sostenibles en la manufactura.

Este análisis sugiere que la literatura reciente se centra en la interacción entre la manufactura *Lean* y la sostenibilidad, destacando la importancia de integrar estas prácticas en las cadenas de suministro para promover un desarrollo más sustentable.

4.2 Análisis de la Literatura

En los últimos años, se ha observado que un creciente número de empresas ha adoptado el enfoque *Lean* para obtener mejoras en su rendimiento operativo, sin embargo, aspectos como la sostenibilidad también emergen como un área crítica en las organizaciones, pues demanda una atención especial para lograr mejoras tanto en el desempeño sostenible como en el impacto ambiental (Fiorello et al., 2023). En este sentido, la integración de la manufactura *Lean-Green*

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

surge como una solución prometedora para equilibrar la sostenibilidad tanto económica como ambiental (Hegedić et al., 2024).

Los estudios revisados proporcionan una visión integral de cómo las prácticas *Lean* pueden ser adoptadas y mejoradas para promover la sostenibilidad y desempeño operativo en los procesos productivos. De esta manera, se comienza a abordar el primer objetivo específico de este estudio, que consiste en identificar herramientas *Lean* mencionadas en la literatura con aplicaciones favorables en productividad y sostenibilidad, estableciendo así las bases para identificar oportunidades de implementación en un contexto agrícola. Así pues, se ha clasificado la literatura encontrada preliminarmente en tres grandes grupos: Industria 4.0 y tecnologías de la información; modelos de decisión y selección de herramientas *Lean*; e impacto sostenible de la adopción de sistemas *Lean*.

4.2.1 Industria 4.0 y Tecnologías de la Información

Uno de los aspectos relevantes a la hora de implementar estrategias *Lean* es la estrecha relación que existe con la industria 4.0, en la medida en que ambos enfoques apuntan al desempeño sostenible en todas las esferas de la cadena de suministro. Por ejemplo, Nayal et al. (2023) examinan la aplicación de la tecnología *blockchain* en la cadena de suministro agrícola y su impacto en la sostenibilidad, encontrando que esta tiene un efecto positivo en el rendimiento de los procesos, dado que, a largo plazo, reduce los costos de transacciones, infraestructura, mantenimiento, operación y retirada de alimentos; lo que se relaciona directamente con el monitoreo de variables clave en las operaciones, actividad propia de la filosofía *Lean*.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

Mariappan et al. (2023) también exploraron la integración de la filosofía *Lean* con la tecnología 4.0 para impulsar la sostenibilidad en las industrias. En su investigación, propusieron el desarrollo de un modelo de mapa de flujo de valor inteligente (SVSM) que permite monitorear en tiempo real las actividades productivas mediante la aplicación de tendencias en tecnologías de la información. El sistema propuesto unifica todos los procesos industriales para predecir la incertidumbre, lo que permite a las empresas identificar oportunidades de mejora, ofrecer una mayor precisión y eficiencia en los datos, y crear estrategias para satisfacer la demanda a tiempo, lo que, a su vez, promueve la eliminación de los desperdicios y la mejora continua.

Otro modelo que combina tecnologías de la industria 4.0 y herramientas *Lean*, es el propuesto por Rahardjo et al. (2023), que consiste en un sistema de Manufactura Inteligente y Sostenible (SSMS) que busca brindar información de gestión relacionada con el impacto social, económico y el ambiental. Al implementar este sistema en una compañía real, se logró eliminar con éxito las variaciones que generaban desperdicios y mejorar el rendimiento empresarial, mediante entornos de trabajo más seguros, nuevas oportunidades laborales y la disminución de desperdicio excesivo de material.

Estos hallazgos resaltan la importancia de adoptar un enfoque integral que combine prácticas lean con tecnologías innovadoras, de manera que se promueva el monitoreo de los procesos clave que componen la cadena de suministro, mediante el uso de herramientas esbeltas y ecológicas como el mapeo del flujo de valor (VSM) y la evaluación del ciclo de vida (LCA), apuntando a identificar y reducir el desperdicio de recursos, lo que contribuye a minimizar el impacto ambiental de las operaciones (Nayal et al., 2023). Por otra parte, aunque estos estudios no se ajustan ni reflejan plenamente la realidad de la agricultura colombiana en términos de desarrollo

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

e inversión tecnológica, contribuyen al cumplimiento del primer objetivo específico de este estudio, al permitir identificar las herramientas que han sido empleadas en economías agrícolas más avanzadas y que sirven como modelo para, en un futuro, implementar aquellas que han tenido un impacto positivo en productividad y sostenibilidad.

4.2.2 Modelos de Decisión y Selección de Herramientas Lean

En la búsqueda de mejorar la eficiencia y sostenibilidad en los procesos productivos, la selección adecuada de herramientas *Lean* se ha vuelto fundamental. Según Naeemah et al. (2023), elegir correctamente estas herramientas puede maximizar los beneficios de la sostenibilidad empresarial, al reducir los gastos de recursos, energía, tiempo y mano de obra. De igual manera, Hegedić et al. (2024) destacan que optar por la herramienta *Lean* adecuada puede tener un doble impacto positivo (económico y medioambiental), resaltando las bondades de herramientas como Kaizen y 5S's que por su naturaleza contribuyen tanto a la mejora continua de procesos, lo que se traduce en menores costos de producción, como a la reducción del impacto ambiental negativo. Estos estudios sirven para identificar y seleccionar adecuadamente las herramientas que pueden beneficiar a una industria específica, considerando sus necesidades y recursos.

Lo anterior contribuye en cierta medida al cumplimiento del objetivo general de la investigación, ya que para identificar oportunidades de implementación de herramientas *Lean*, es fundamental conocer cuáles se ajustan mejor al contexto particular. Si bien no se prevé aplicar directamente ninguno de los modelos presentados en los estudios que se describirán a continuación, estos sirven como referencia para una futura selección de herramientas en un contexto industrial más desarrollado. Un claro ejemplo de esto es el presentado en el estudio de Hegedić et al. (2024), cuyo objetivo se basó en desarrollar un modelo de toma de decisiones que

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

facilitara la implementación de herramientas *Lean* en función de las prioridades de desempeño económico y ambiental de una empresa. Para esto se llevaron a cabo cinco etapas, que consistieron en revisión de literatura, realización de entrevistas semiestructuradas, encuestas a expertos, desarrollo de un modelo de selección y, finalmente, verificación a partir de datos reales y simulados. Los resultados mostraron que las herramientas *Lean* más populares influyen positivamente en los indicadores económicos y ambientales, convirtiéndolas en un recurso importante para las empresas que desean combinar metodologías *Lean* con prácticas sostenibles.

En este mismo enfoque, Naeemah et al. (2023) presentan una propuesta de modelo híbrido de selección de herramientas propias de la manufactura esbelta en función de su efecto sobre la sostenibilidad. Mediante la aplicación del modelo en una empresa real, el estudio mostró como resultado que la herramienta de mapeo de flujo de valor (VSM) fue la más importante, además, proporcionó 16 métricas de sostenibilidad aplicables y otras 12 herramientas *Lean* que podrían funcionar como una base para maximizar el rendimiento de la sostenibilidad.

Finalmente, Batwara et al. (2024) aterrizan un poco más esta línea de investigación mediante su propuesta de un método de índice de selección de preferencias basado en datos difusos. Este modelo buscaba estudiar la interrelación entre métricas e indicadores para construir la versión más adecuada de un mapa de flujo de valor inteligente y sostenible (SS-VSM), el cual integra herramientas *Lean* sustentables e inteligentes. Como resultado de esta investigación, se logró proponer un esquema de VSM que sugiere ser el óptimo para incrementar la sostenibilidad en las empresas, considerando factores ambientales, económicos y sociales.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

Estos estudios subrayan la relevancia de optimizar los recursos disponibles en la cadena de suministro mediante la valorización de los subproductos generados durante algunos procesos. Este enfoque no solo fomenta en mayor medida la implementación de prácticas sostenibles, sino que también facilita el desarrollo de operaciones más efectivas, al tiempo que reduce el impacto ambiental y mejora los beneficios económicos.

4.2.3 Impacto Sostenible de la Adopción de Sistemas *Lean*

La integración de herramientas Lean con un enfoque sostenible ha demostrado ser una estrategia eficaz para optimizar procesos productivos y reducir impactos ambientales, sociales y económicos.

Una de las metodologías más destacadas es el Value Stream Mapping (VSM), que en conjunto con sus variantes ambientales como el Environmental Value Stream Mapping (E-VSM), permiten identificar desperdicios y puntos críticos en los procesos, facilitando la intervención en áreas clave. Por ejemplo, en el estudio de los procesos productivos de una fábrica de néctar fue posible evidenciar que la implementación de la herramienta E-VSM reveló pérdidas significativas de agua y materia prima, lo que condujo a la adopción de sistemas de recirculación y a la capacitación de operarios para mejorar el uso eficiente de los recursos (Bancovich et al., 2023). De forma similar, en la industria textil, el uso del VSM combinado con Kaizen mejoró los tiempos de ciclo y redujo el consumo de agua y energía, evidenciando que las herramientas Lean pueden ser decisivas en la transición hacia operaciones más sostenibles (De-la-Flor et al., 2024).

Otra herramienta fundamental y con muy buenos resultados en su aplicación en la industria es Kaizen, la cual impulsa la mejora continua y la reducción de desperdicios. Su implementación ha mostrado beneficios en factores como la productividad y el bienestar del personal, fomentando

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

un cambio cultural en las organizaciones, como se demuestra en una investigación sobre procesos de mejora en una planta de autopartes, donde la adopción de Kaizen combinada con estándares operativos mejoró la satisfacción laboral en un 49% y redujo las emisiones de carbono en más del 30%, demostrando que estas metodologías no solo optimizan los procesos, sino que también tienen un impacto positivo en la sostenibilidad ambiental y social (Kanan et al., 2023). Este enfoque también se destacó en una compañía fabricante de bombas de agua, donde el uso de Kaizen y las 3R (reducir, reutilizar, reciclar) logró eliminar actividades sin valor agregado y optimizar los recursos disponibles, incrementando la eficiencia del ciclo de producción en un 11% (Saraswati et al., 2024).

La metodología 5S ha sido igualmente efectiva al mejorar la organización del lugar de trabajo, lo que no solo contribuye a la eficiencia operativa sino también a la seguridad y la ergonomía. En procesos de soldadura, la aplicación de 5S redujo los defectos y mejoró significativamente las condiciones laborales, creando un entorno más seguro y ordenado (Manzanares-Cañizares et al., 2022), lo que refuerza la importancia de mantener una cultura de mejora continua, donde la estandarización de procedimientos y la disciplina operativa aseguren la sostenibilidad de las mejoras en el tiempo.

Por otro lado, Poka-Yoke, una herramienta centrada en la prevención de errores, también ha mostrado ser particularmente útil desde su propósito basado en la eliminación de defectos en procesos complejos. En la misma empresa de producción de bombas de agua, esta técnica se combinó con procedimientos operativos estándar (SOPs) para evitar errores humanos, mejorando la calidad del producto y reduciendo tiempos de espera innecesarios (Saraswati et al., 2024). Asimismo, en la industria textil, la estandarización del trabajo mediante SOPs y la implementación

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

de SMED (Single-Minute Exchange of Die) redujo los tiempos de cambio entre lotes, optimizando el flujo de producción y contribuyendo a un uso más eficiente de los recursos (De-la-Flor et al., 2024).

El papel de la cultura Lean es un factor determinante en la sostenibilidad de los cambios introducidos. La mejora continua, la reducción de desperdicios y la organización del lugar de trabajo no solo son aspectos operativos, sino que también generan un impacto significativo en la calidad del ambiente laboral y en la motivación del personal. Esto se evidenció en la industria alimentaria en Bagdad, donde la combinación de prácticas Lean con una cultura orientada al pensamiento esbelto logró aumentar la productividad y reducir costos a través de la eliminación de actividades innecesarias (Musa y Alwan, 2024). La adopción de esta cultura asegura que las mejoras implementadas no sean eventos aislados, sino parte de un proceso sostenido que evoluciona en el tiempo.

Los estudios revisados sugieren que la combinación de herramientas Lean con enfoques sostenibles no solo optimiza la eficiencia operativa, sino que también tiene un impacto positivo en la sostenibilidad ambiental y social. No obstante, algunos estudios indican que los beneficios económicos pueden no ser inmediatos, como en el caso de empresas alimentarias en Ghana, donde las prácticas Lean mejoraron la eficiencia pero no tuvieron un impacto significativo en la rentabilidad (Kofi et al., 2023). Esto resalta la importancia de complementar las metodologías Lean con prácticas verdes para maximizar los beneficios en los tres pilares de la sostenibilidad: económico, social y ambiental. La literatura demuestra que las herramientas Lean, cuando se aplican junto con una cultura orientada a la mejora continua y un enfoque integral en la gestión de

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

recursos, constituyen una vía prometedora hacia operaciones más responsables, eficientes y sostenibles.

Luego de abordar cada uno de los grupos en los que se decidió encasillar la literatura analizada, es importante remarcar que, si bien en cada investigación se hace lo propio por incluir la integración de los enfoques *Lean* y *Green*, en pocos casos el objetivo general gira en torno a la aplicabilidad de dichos aspectos en la industria agrícola, sector en el que, específicamente, no se presentan indicios de evolución e interés a nivel investigativo. Así mismo, y para validar el hecho anterior, en ninguno de los artículos revisados se estudia o siquiera se menciona la caña de azúcar y/o la panela, importantes para el estudio que se adelanta desde esta investigación y con un gran valor económico y social para el agro colombiano.

En relación con la temática específica de la producción de panela, se revisaron estudios publicados en la base de datos Scielo y el motor de búsqueda académico Google *Scholar*, en donde se encontraron trabajos como el de Gonzales y Zuñiga (2022), quienes realizaron una investigación en una provincia de Ecuador, donde aplicaron una matriz de interacciones para evaluar las relaciones entre las actividades propias del proceso productivo de la panela y los factores ambientales, clasificados en bióticos, abióticos y socioeconómicos. A partir de esta evaluación, desarrollaron una matriz de severidad de impactos que, mediante la asignación de rangos numéricos, les permitió identificar las actividades con mayores efectos ambientales negativos. Destacaron los impactos sobre el factor abiótico del aire, principalmente debido al uso de leña y bagazo como combustibles en las hornillas, lo que provoca una significativa emisión de contaminantes. De manera similar, en el ámbito nacional, estudios como el de Ordoñez-Díaz y Rueda-Quiñónez (2017) en el departamento de Santander, Colombia, también evaluaron los

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

impactos socioambientales de la producción de panela utilizando como herramienta la matriz de Leopold. Este enfoque les permitió relacionar las actividades productivas con factores ambientales clave y determinar con base en sus observaciones las diferentes ponderaciones para cada ítem. Los resultados indicaron una profunda insostenibilidad del sector, obteniendo una calificación final en la matriz de Leopold de -59, lo que subraya la magnitud de los daños al medio ambiente, especialmente en los recursos abióticos como el agua y el aire. Este estudio pone de manifiesto la urgencia de implementar medidas correctivas en el sector, dada la vulnerabilidad del entorno físico ante las prácticas de producción tradicionales.

En concordancia con lo anterior, se advierte una necesidad de estudio respecto a la aplicabilidad del enfoque *Lean* en el sector agroindustrial, yendo más allá de productos tradicionalmente estudiados como el café y haciendo énfasis en los beneficios económicos, sociales y medioambientales que puede proporcionar al gremio productor.

5. Marco Teórico

5.1 *Lean Management*

Se puede definir el *Lean Management* como una filosofía de gestión empresarial que se centra en la maximización del valor para el cliente a la vez que se minimizan los desperdicios (Johansson y Osterman, 2017). Estos últimos son clasificados por Ohno (1988), como sobreproducción, retrasos en el proceso, transporte innecesario, sobre procesamiento, exceso de inventario, movimiento innecesario, productos defectuosos, y en sí, cualquier proceso de

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

transformación que no haga que el consumidor o cliente esté dispuesto a pagar por el producto (Yarbrough et al., 2022).

Tal como se plantea en García et al. (2021), esta filosofía se basa en principios como la eliminación de actividades que no agregan valor, la optimización de los flujos de trabajo y la mejora continua, de manera que se impacte positivamente en la cadena de suministro a través de la reducción de costos, aumento de la calidad e incremento de la flexibilidad para satisfacer de manera más eficiente las demandas del cliente.

Al aplicar este concepto específicamente en el área de procesos productivos, surge en la misma línea el *Lean-Manufacturing* que, con un enfoque similar, se centra en la eliminación continua de desperdicios (Jamwal et al., 2021), disminución en tiempos de abastecimiento y mejoramiento de la productividad en los procesos de fabricación (Ciano et al., 2021).

Como lo sugiere Deshmukh (2022), el término de manufactura esbelta corresponde a una guía que les permite a los gerentes identificar los desechos en cada uno de los pasos que constituyen el proceso productivo para, posteriormente, eliminarlos. De esta manera, las compañías logran obtener mayores beneficios a costa de menor esfuerzo, costo y tiempo (Womack y Jones, 1996) mientras se responde de manera efectiva a la demanda y necesidades del cliente (Wilson, 2010).

A lo largo del tiempo se ha desarrollado un conjunto de herramientas conocidas como *Lean Tools*, las cuales apuntan al cumplimiento del propósito principal de esta filosofía. A continuación, se describen brevemente.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

5.1.1 Lean Tools

Las *Lean Tools*, también conocidas como herramientas *Lean*, son un conjunto de técnicas y metodologías utilizadas en el *Lean Management* para identificar y eliminar los desperdicios, y de este modo, mejorar los procesos de una organización. En la Tabla 2 se explican algunas de las herramientas más comunes que serán de vital importancia para el desarrollo de este proyecto.

Tabla 2

Definición herramientas lean

Herramienta	Definición	Autor(es)
<i>Kaizen</i>	Uno de los pilares de la fabricación japonesa, es la búsqueda constante de la mejora continua en los procesos de una compañía. Permite reducir el uso de recursos como materias primas, energía, costos y tiempos de producción, al tiempo que mejora la eficiencia, la calidad y reduce los defectos de los productos.	Imai (1986); Yusup et al. (2015); Naeemah y Wong (2023).
<i>Value Stream Mapping</i>	Representa gráficamente las actividades de la cadena de suministro, desde la materia prima hasta el consumidor final, diferenciando las que agregan valor de las que no. Es una herramienta de comunicación, planificación y gestión del cambio para la mejora continua en procesos de producción.	Sihag et al. (2014); Sharma et al. (2023)
<i>Key Performance Indicators (KPIs)</i>	Son métricas que miden la efectividad de los procesos de una organización en función de sus objetivos. Permiten monitorear y evaluar el progreso de los resultados, optimizando la toma de decisiones para las partes interesadas.	Spackman et al. (2019); Guleria et al. (2021); Ferreira et al. (2024)
<i>5S</i>	Busca organizar y mantener seguros los ambientes de trabajo para optimizar los procesos de fabricación y reducir desperdicios. Consta de 5 componentes (<i>Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu, Shitsuke</i>) que permiten estandarizar y facilitar mejoras futuras.	Muotka et al. (2023)

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

<i>Poka Yoke</i>	Es un dispositivo o técnica a prueba de todo que garantiza la producción continua de unidades sin defecto. El propósito de estos dispositivos especiales es prevenir errores y proporcionar una rápida información sobre los problemas existentes.	Render y Heizer (2007)
Trabajo estándar	Es una herramienta que define la secuencia óptima de actividades para llevar a cabo una actividad o proceso. Su uso es esencial en la evaluación y soporte de la producción sincronizada, ya que permite revisar el rendimiento del proceso y el tiempo de ciclo, facilitando la identificación de mejoras, la reducción de variaciones y garantiza resultados consistentes y de alta calidad.	Wilson (2010)
<i>A3 report</i>	Este reporte está enfocado en facilitar el uso de herramientas destinadas a mejorar los niveles de servicio y calidad, al mismo tiempo que contribuye a eliminar desperdicios en los procesos. Su objetivo es identificar reprocesos o desperdicios en la cadena de producción, permitiendo recopilar información clave sobre un problema particular o una serie de cuestiones dentro de la cadena, que pueden ser detectadas en períodos breves.	Pajuelo et al. (2023)

5.2 Operaciones Sostenibles

Las operaciones sostenibles son un concepto de gestión crucial que integra prácticas de producción en los ámbitos económico, ecológico y social. En términos generales, abarcan aspectos como el manejo estratégico, la seguridad laboral, los derechos humanos, la economía, la ecología, la sociedad y la seguridad de los productos (Liu et al., 2021).

En este enfoque, surge el concepto de Producción Limpia, que busca reducir el uso de recursos naturales, minimizar la generación de residuos, disminuir las emisiones y optimizar el consumo de energía (Shrouf y Miragliotta, 2015), y además se centra en la eficiencia y la sostenibilidad, adaptándose a las demandas cambiantes de los consumidores con relación a la responsabilidad ambiental de las organizaciones.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

De manera general, para dar cumplimiento al objetivo de las operaciones sostenibles y la producción limpia, existen diversidad de métodos, herramientas y prácticas diseñadas precisamente para contribuir a la disminución de la degradación ambiental y sus consecuencias. A este conjunto de prácticas se les denomina Gestión Ambiental (Sharma, 2009), y se enfocan en la reducción de residuos, la eficiencia de los recursos, la conservación de la energía, el ecodiseño, entre otras alternativas amigables con el medio ambiente (Bansal y Roth, 2000).

Finalmente, con el propósito de evaluar los beneficios de la implementación de estas prácticas, surge el término de Huella Ecológica, definido por Gao et al. (2022) como una métrica o indicador que compara la disponibilidad actual y capacidad máxima de recursos naturales con la demanda humana y que, además, cuantifica los recursos necesarios para producir los bienes y servicios consumidos por una población específica y los necesarios para degradar los desechos que se generan, sin comprometer la disponibilidad futura de estos recursos ni la calidad ambiental (Tabash et al., 2023).

5.3 Lean-Green

En la actualidad, para que una empresa se mantenga competitiva, debe enfocarse en ofrecer un valor agregado a sus clientes mediante productos beneficiosos y respetuosos con el medio ambiente. Lograr esto requiere condiciones como la implementación de estrategias y operaciones eficientes, impulsadas por el ahorro de energía y otros recursos, la adopción de tecnologías adecuadas, el desarrollo de capacidades humanas y el fomento de un entorno organizacional efectivo (Abreu et al., 2017).

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

Lean-Green es un enfoque integrado que combina los principios y herramientas del *Lean Management*, centrados en la eliminación de desperdicios y la mejora continua de procesos, con las prácticas de gestión ambiental y sostenibilidad, apuntando a reducir el impacto ecológico de las operaciones. Al combinar las metodologías *Lean* con iniciativas de cadena de suministro verde, no solo se garantiza la sostenibilidad en el tiempo de las organizaciones, sino que también se mejora significativamente su desempeño económico (Singh et al., 2020), social y ambiental (Azevedo, 2012). En otras palabras, este concepto surge como resultado de los retos que enfrentan las empresas para replantear sus objetivos y estrategias, con el fin de generar mayor valor mientras contribuyen a la equidad social y previenen cargas ambientales (Abreu et al., 2017).

Dües et al. (2013) también definen el modelo *Lean-Green* como la utilización de las prácticas y herramientas *Lean* como un medio para alcanzar la sostenibilidad y disminuir los efectos adversos del impacto ambiental, lo que resulta en mejorar la calidad del producto y aumentar la satisfacción del consumidor (Benabdellah et al., 2024) sin comprometer los recursos del futuro.

Como lo menciona Abreu et al. (2017) la ecoeficiencia, como principio central de *Lean-Green*, traduce la idea de "crear más con menos" al buscar maximizar la creación de valor para el cliente, desde la perspectiva *Lean*, optimizando los procesos y utilizando la mínima cantidad de recursos e insumos, y desde la perspectiva *Green*, reduciendo los impactos ecológicos adversos derivados de las actividades productivas.

Todo lo anterior se logra eliminando sistemáticamente los desperdicios, mejorando continuamente y haciendo un uso más eficiente de materiales, energía, tiempo y esfuerzo,

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

minimizando las emisiones contaminantes, los residuos, el consumo de agua y energía no renovables, así como promoviendo el uso de materias primas renovables y recicladas cuando sea posible.

6. Metodología

Este proyecto de investigación se realizó bajo una metodología de tipo mixta y de acuerdo con el método de estudio de casos múltiples que, según (Ponce, 2018), proporciona rigor científico a la investigación al establecer las bases para la generalización a través del análisis de similitudes y diferencias entre un número moderado de casos. El estudio de caso múltiple se acopla con los objetivos de esta investigación porque permite una comprensión más profunda y detallada de los factores que afectan la sostenibilidad del sector panelero al analizar varias unidades productivas en lugar de una sola. Esto permite establecer una base para la generalización de los hallazgos y la selección de herramientas *Lean* basadas en problemáticas que afectan total o parcialmente a un sector en lugar de limitarse a una sola unidad productiva. Para llevar a cabo el estudio y alcanzar los objetivos propuestos, se definieron cuatro fases que se desarrollan de la siguiente manera:

6.1 Fase 1: Recopilación de Herramientas *Lean* Descritas en la Literatura

En esta fase, se realizó un análisis de literatura para identificar las herramientas *Lean* que han tenido un impacto positivo en los procesos productivos a nivel económico, ambiental y/o social, sin importar su tipo o campo de aplicación. Las herramientas encontradas fueron sometidas a un análisis de aplicabilidad en el sector agrícola, específicamente en las condiciones económicas y de desarrollo de las unidades productivas de la provincia de Guanentá. Este análisis se llevó a cabo con la colaboración de expertos en herramientas *Lean*, a quienes se les contextualizó con las

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

problemáticas identificadas en la segunda fase y, posteriormente, se les compartió una serie de soluciones fundamentadas en la aplicación de herramientas *Lean* para que emitieran su juicio de valor. Este ejercicio permitió determinar objetivamente cuáles herramientas son beneficiosas para los productores, considerando sus necesidades y disponibilidad de recursos, y estableció las bases para la elaboración de la guía de implementación de herramientas *Lean*.

La recolección de la información proporcionada por el panel de expertos y su respectivo análisis se hicieron siguiendo la metodología Delphi, que según Varela-Ruiz et al. (2012) permite el uso del juicio subjetivo de expertos en determinada temática cuando se carece de información objetiva, como en este caso, que se pretende determinar la aplicabilidad de herramientas *Lean* en el sector panelero de Guantán conociendo únicamente sus problemáticas sociales, ambientales y económicas. La selección del panel de expertos no se limitó a ingenieros industriales; también se incluyó un ingeniero mecánico y uno agrícola para abordar ciertos aspectos técnicos. La elección se basó en la disponibilidad y voluntad para participar en el proceso, teniendo en cuenta las limitaciones presupuestales del estudio.

6.2 Fase 2: Reconocimiento del Contexto Productivo, Métodos, Tecnologías, y Recursos Utilizados Para la Fabricación de Panela en el País y en la Provincia de Guantán

Para dar cumplimiento al segundo y tercer objetivo, en esta sección, se definieron dos escenarios de la producción de panela: uno a nivel nacional y otro a nivel provincial. Se revisó información disponible en el Ministerio de Agricultura, AGROSAVIA, Fedepanela y otras entidades gubernamentales y no gubernamentales que pudieran aportar detalles relevantes sobre el proceso productivo de la panela. El documento guía para esta fase fue el manual de BPA y BPM

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

en la producción de caña y panela elaborado por Osorio (2007), esto debido a la claridad y confiabilidad de la información presentada.

Simultáneamente, con el objetivo de recolectar datos cualitativos y cuantitativos sobre las operaciones, mediante entrevistas no estructuradas y observación directa, se realizó un trabajo de campo en cinco unidades productivas de la provincia de Guanentá, seleccionadas con base en criterios de accesibilidad y disposición de los productores para participar. Este enfoque por conveniencia fue necesario debido a las dificultades inherentes al acceso a estas unidades, especialmente cuando la iniciativa de investigar y mejorar sus procesos no proviene de ellos mismos. Las visitas a las unidades productivas no solo permitieron corroborar la información sobre las distintas etapas del proceso, sino también identificar las diversas problemáticas y deficiencias en sostenibilidad que estas unidades deben enfrentar. La información recopilada durante las visitas, a través de entrevistas no estructuradas, se puede evidenciar en el apéndice A.

6.3 Fase 3: Análisis de Resultados y Socialización de Oportunidades de Mejora

Una vez concluidas las etapas preliminares, en esta fase se analizaron los resultados obtenidos de la caracterización, destacando las problemáticas y sus soluciones desde la aplicación de herramientas *Lean* con enfoque sostenible. Este análisis se realizó bajo los principios de la investigación cualitativa, siguiendo las directrices de clasificación de la información para identificar temas relevantes y patrones útiles para el cumplimiento de los objetivos de este estudio. La comparación constante de los datos obtenidos en campo con la teoría permitió una interpretación más rigurosa de las problemáticas detectadas y las soluciones propuestas desde la aplicación de herramientas *Lean* con enfoque sostenible.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

Las herramientas validadas por los expertos, cuya aplicabilidad fue considerada viable en el contexto de la producción de panela en la provincia de Guanentá, se incluyeron en una guía de implementación de herramientas *Lean*, que tiene como objetivo ofrecer a los productores soluciones prácticas para enfrentar las dificultades que afectan tanto sus ingresos como la sostenibilidad de su actividad a largo plazo.

Por otra parte, se realizó una actividad de socialización con los productores, en donde se les dio a conocer el alcance de esta investigación, los hallazgos y los resultados obtenidos a través de la validación con expertos. La reunión se llevó a cabo utilizando tecnologías de la información y comunicación (TIC) debido a la limitada disponibilidad de tiempo tanto de los investigadores como de los productores. En este espacio, se facilitó la transmisión del conocimiento técnico sobre la aplicación de herramientas *Lean* de manera didáctica y comprensible para los productores, a través de la socialización de la guía de implementación de herramientas *Lean*, presentada en el apéndice B.

6.4 Fase 4: Elaboración del Artículo Publicable

En la fase final del proyecto y cumpliendo con el último objetivo específico, se llevó a cabo la elaboración de un artículo de investigación publicable, en el que se registraron los alcances del estudio y aquellos apartados importantes que evidencian el trabajo realizado con las unidades productivas de panela en la provincia de Guanentá.

6.5 Descripción de la Muestra

Antes de presentar la sección de resultados, que incluye todo el trabajo realizado con las unidades productivas y la información de las fases previamente descritas, la Tabla 3 ofrece un resumen de las condiciones variables entre las unidades participantes en el estudio. Estas características permiten entender por qué, en diferentes etapas del proceso, algunas unidades productivas enfrentan limitaciones tecnológicas o de herramientas.

Para identificar las unidades productivas participantes en el estudio, se utilizó una nomenclatura anónima: “UP” (Unidad Productiva), seguido de un número asignado según el orden de las visitas realizadas durante el trabajo de campo. Por lo tanto, en adelante, las cinco unidades productivas se referirán desde UP1 hasta UP5, manteniendo su anonimato correspondiente.

Tabla 3

Características de las unidades productivas en el caso de estudio

Variable	Descripción	UP1	UP2	UP3	UP4	UP5
Antigüedad	< 5 años		x			
	< 10 años	x				
	> 10 años			x	x	x
Estado general de las instalaciones	Bueno	x		x		
	Regular		x		x	x
	Malo					
Acceso a vías principales	Fácil	x		x		
	Regular		x			
	Difícil				x	x
Formas de Organización productiva utilizadas	Propia o directa	x	x	x	x	x
	Aparcería o cuarto	x		x		
	Arrendamiento de trapiche	x	x	x		x
Sistema de flujo de los jugos sobre la línea de calor	normal				x	x
	contra flujo					

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

	combinado	x	x	x	
Tiene bagacera delimitada y bajo techo	x	x		x	x
Usa combustibles adicionales al bagazo (madera, llantas, etc.)		x		x	x
Tiene cuarto de moldeo	x		x		

En términos generales, la unidad productiva más avanzada en cuanto a desarrollo estructural, inocuidad del proceso y productividad es la UP3. Además, es la más moderna de todas y su diseño incorpora tecnologías novedosas para mejorar la eficiencia energética, como la cámara Ward-Cimpa, que permite usar el bagazo recién salido del molino para la combustión. En segundo lugar, se ubica la UP1, que aún conserva elementos del antiguo trapiche artesanal, pero ha implementado mejoras en la hornilla, el cuarto de moldeo, los fondos y el molino. Las tres unidades restantes mantienen características muy artesanales, con trapiches de más de cincuenta años de antigüedad, cuyas únicas renovaciones han sido en la cubierta por temas de necesidad. Es importante señalar que las UP1, UP2 y UP3 están ubicadas en Ocamonte, municipio conocido por su alta producción de panela en comparación con Coromoro, donde se ha optado por cultivos alternativos como el café.

Reconocer el estado de las unidades productivas es fundamental para este estudio, ya que por un lado contribuye al cumplimiento del tercer objetivo, que busca caracterizar el sector panelero en Guanentá, y por el otro, proporciona una comprensión clara de las condiciones en las que se debe planificar la implementación de herramientas orientadas a mejorar las condiciones insostenibles.

7. Resultados

7.1 Caracterización del Sector Panelero

En este apartado se describe el proceso de producción de panela, explorando los diversos factores ambientales y tecnologías utilizadas a nivel nacional, lo que se relaciona directamente con el cumplimiento del segundo objetivo específico. Simultáneamente, la temática se concentra en el contexto local de la provincia de Guantánamo, abordando el tercer objetivo específico, en donde se establecen las condiciones del sector y se aporta información relevante del proceso basada en datos obtenidos directamente de los productores.

La obtención de panela a partir de la caña de azúcar requiere actividades preliminares a la etapa de la cosecha, como lo son: la preparación del terreno, la siembra, el control de arvenses, la recomposición del suelo (fertilización) y los controles fitosanitarios. Dichas actividades, de las que dependerá el desarrollo y rendimiento de los cultivos de caña se encuentran bien descritas en el Manual de BPA y BPM en la producción de caña y panela elaborado por Osorio (2007), por lo que en este documento no se ahondará en esta temática. Sin embargo, a continuación, se revisan algunos aspectos importantes de esta primera etapa, enmarcada en el eslabón de abastecimiento de la cadena de suministro por corresponder a la obtención de la materia prima para el proceso de transformación.

7.1.1 Cultivo

Un factor ambiental determinante en la producción de caña es la calidad y los nutrientes del suelo. Según Osorio (2007), el cultivo de caña remueve grandes cantidades de elementos nutritivos del suelo (N ; P_2O_5 ; K_2O ; CaO ; MgO), los cuales deben devolverse mediante las

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

fertilizaciones minerales adecuadas. Dichas fertilizaciones deberán realizarse bajo la premisa del análisis de suelos que determine la fertilidad, salinidad, pH y demás características del terreno. Esta labor, además de requerir de la ayuda de un profesional, representa costos adicionales a los trabajadores. Si bien, en las unidades productivas visitadas se evidenció la ausencia de análisis de suelos para conocer la manera correcta de fertilizar, los agricultores reconocen la importancia del abono para el cultivo:

...ya hoy día cultivo que no se abone no sirve, la producción es muy bajita, yo creo que con una buena abonada uno puede subir al doble la producción (UP1).

Por otra parte, también es necesario realizar el control de arvenses, cuyo periodo crítico de competencia por agua, luz y nutrientes ocurre en las etapas de germinación y macollamiento de la caña (Osorio, 2007). Cabe destacar que esta labor se puede llevar a cabo de manera manual, con una herramienta popularmente conocida como azadón, o utilizando herbicidas. A continuación, el productor de la UP1 explica en sus palabras el impacto al medio ambiente que esta última actividad ha generado:

...Día a día con esos herbicidas uno ha visto que la tierra se va como deteriorando, pero una de las causas por las cuales se abusa echando herbicidas es porque la gente hoy día, culturalmente, ya no le quiere echar azadón y deshierbar de manera manual, entonces se apoyan en los herbicidas (UP1).

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

Respecto a los factores ambientales que favorecen el cultivo, según Quezada (2007), la caña de azúcar es una planta que se adapta bien a climas tropicales y cálidos. La temperatura promedio ideal para su desarrollo óptimo es de aproximadamente 25 grados centígrados, pero se puede cultivar desde el nivel del mar hasta aproximadamente 2,200 metros sobre el nivel del mar (msnm). A continuación, se presenta una tabla que relaciona la altitud del terreno con el tiempo de maduración de la caña.

Tabla 4

Altitud del terreno y tiempo de maduración de la caña.

Altitud (msnm)	Tiempo de maduración
0 a 600 msnm	11 a 12 meses
600 a 1200 msnm	12 a 15 meses
1200 a 1600 msnm	14 a 18 meses

Cabe destacar que la información anteriormente descrita, depende de otros factores como la variedad utilizada (Osorio, 2007). La información presentada anteriormente fue corroborada por los productores, quienes se encuentran entre los 800 msnm y los 1300 msnm. Las cinco unidades productivas reportaron tiempos de maduración de cultivo similares a los mencionados, utilizando la variedad de caña 77-11, conocida también como pierna bella (ver Figura 3).

Figura 3

Variedad y cultivo de caña. (a) variedad de caña UP3. (b) cultivo de caña UP2



(a)

(b)

Una vez tenidos en cuenta algunos detalles correspondientes a la etapa de cultivo, a partir de dicho periodo, el proceso productivo de la panela se divide en tres etapas o momentos fundamentales: Cosecha, Post cosecha y producción de la panela. A continuación, se describen las operaciones de cada etapa y los factores involucrados.

7.1.2 Cosecha

Esta labor, como se describió anteriormente, se lleva a cabo generalmente entre los 12 y 18 meses después de la siembra, dependiendo de las condiciones climáticas, la altura y el tipo de caña cultivada. Dicha tarea se debe comenzar al menos unos días antes de que inicie el proceso de molienda (UP1, UP5) y, según las costumbres locales o el tamaño del lote, se puede realizar bajo dos sistemas de corte: Por entesaque, apropiado para lotes pequeños o tierras con mucha pendiente, o por parejo, en cultivos más grandes y siembras comerciales (Osorio, 2007).

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

En cuanto a las tecnologías empleadas para la labor de corte, esta se puede realizar de manera manual o mecanizada. En la cosecha manual, se emplea el machete como herramienta de corte. La elección de la mecanización de la cosecha depende de diversos factores como las condiciones del terreno, el tamaño del cultivo, el acceso a la maquinaria, entre otros (Galvis, 2010). A continuación, se presenta un cuadro comparativo que destaca algunas de las características más relevantes de las tecnologías de corte anteriormente mencionadas.

Tabla 5

Características de las tecnologías de corte

Variable	Cosecha manual	Cosecha mecanizada
Tiempo de permanencia	Alto tiempo de permanencia 25h - 40h	Bajo tiempo de permanencia 4h - 10h
Eficiencia	Rendimiento del operario: 2- 4 ton/hombre/día	Rendimiento de la cosechadora: 24- 25 ton/h
Exigencias	Requiere supervisión para evitar accidentes y garantizar la calidad Alto costo de la labor Mayor número de operarios	Mejor des compactación de los suelos Adecuación de los campos Variedades de caña apropiadas Menor costo por tonelada

Nota. Adaptado de Galvis, (2010).

Como se observa en la tabla anterior, la mecanización de la cosecha puede representar significativos aumentos de la productividad por hectárea y ofrecer una solución a la escasez de mano de obra. Sin embargo, esta opción también implica desafíos importantes que pueden desincentivar su adopción, como la necesidad de un alto capital de inversión, las limitaciones

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

impuestas por la topografía de las zonas de cultivo y los conocimientos técnicos sobre el manejo de la maquinaria (UP5).

7.1.3 Post Cosecha

Una vez se realiza el corte de la caña, comienza la etapa de postcosecha, que, aunque es la más breve del proceso, requiere la mayor utilización de capital humano y fuerza animal para el transporte. Generalmente se utilizan mulas o burros (ver Figura 4), aunque dependiendo del terreno y las costumbres locales, también se pueden emplear vehículos pequeños como camiones (Quezada, 2007). Durante esta etapa los operarios también se encargan de limpiar la caña, dejando las hojas como material orgánico en el mismo cultivo, lo que contribuye a la recuperación de algunas propiedades del suelo (UP1). Los tallos de caña, una vez despejados, se transportan al trapiche para su molienda.

Figura 4

Transporte de caña. (a) transporte de caña UP4. (b) transporte de caña UP1



(a)



(b)

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

En las cinco unidades productivas visitadas en la provincia de Guanentá, se emplea el sistema de corte por parejo. Este método implica que la caña se cargue directamente en las mulas desde el lugar de corte, a diferencia del sistema de entresaque, donde el trabajador debe cargar la caña en el hombro hasta salir del cañal y luego cargar las mulas para el transporte hasta la zona de apronte. El enfoque de corte por parejo no solo mejora el uso de la fuerza laboral, sino que también reduce el tiempo y esfuerzo necesarios para el transporte de la caña (Osorio, 2007).

La caña que llega de los lotes de cultivo se apila en la zona de apronte, donde los trabajadores descargan los animales y colocan las cañas en el suelo, generalmente de concreto. Luego, los trabajadores regresan al cañal para continuar con su labor mientras que, en la zona de apronte, un operario se encarga de acercar la caña al molino para continuar con el proceso. Esta tarea es necesaria debido a la falta de un sistema o tecnología que permita el abastecimiento automático y continuo de la caña desde la zona de apronte hasta el molino. (Ver Figura 5)

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

Figura 5

Abastecimiento de caña de la zona de apronte a la zona de molienda. a. carga en zona de apronte.

b. Traslado a zona de molienda



(a)

(b)

Respecto a las tecnologías utilizadas en esta etapa, además de las mencionadas anteriormente (mulas y vehículos), la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), también ha desarrollado un sistema de transporte por cable de gravedad o autopropulsado para el acarreo de caña panelera. Según Deantonio-Florido et al. (2020) este sistema no solo permite un ahorro de tiempo y costos de transporte, sino que también contribuye a la reducción de los requerimientos de mano de obra, la incidencia del maltrato animal y la compactación de suelos. Sin embargo, al ser una tecnología emergente que requiere una inversión considerable (Aproximadamente 110 millones de pesos en el 2016), aún no es accesible para los productores incluidos en este estudio.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

Para finalizar, es importante destacar que las actividades de cosecha y post cosecha, que culminan con la entrega de la caña como materia prima para la producción de panela, generan impactos significativos en algunos factores ambientales. Como lo señalan Ordoñez-Díaz y Rueda-Quiñónez (2017), desde el momento en que la caña es cortada, se interrumpe la fotosíntesis de las plantas, lo que reduce los niveles de oxígeno producido y la captación de dióxido de carbono en la atmósfera. Además, el uso de animales para transportar la caña contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como el metano, el óxido nitroso y el amoníaco, debido a la producción de estiércol (Pinos-Rodríguez et al., 2012).

Por su parte, el productor de la UP3 hace la claridad de que estas tareas junto con la producción de panela se relacionan directamente con los factores ambientales en cuanto al rendimiento de la actividad:

... En tiempos de verano, este oficio rinde mucho, porque la trocha está en buenas condiciones, a los obreros les rinde el corte y la hornilla está trabajando ayudada por el calor del ambiente, mientras que en invierno si la producción se vuelve más lenta, empezando porque la hornilla siempre tiende a demorarse un poco más (UP3).

7.1.4 Producción de panela

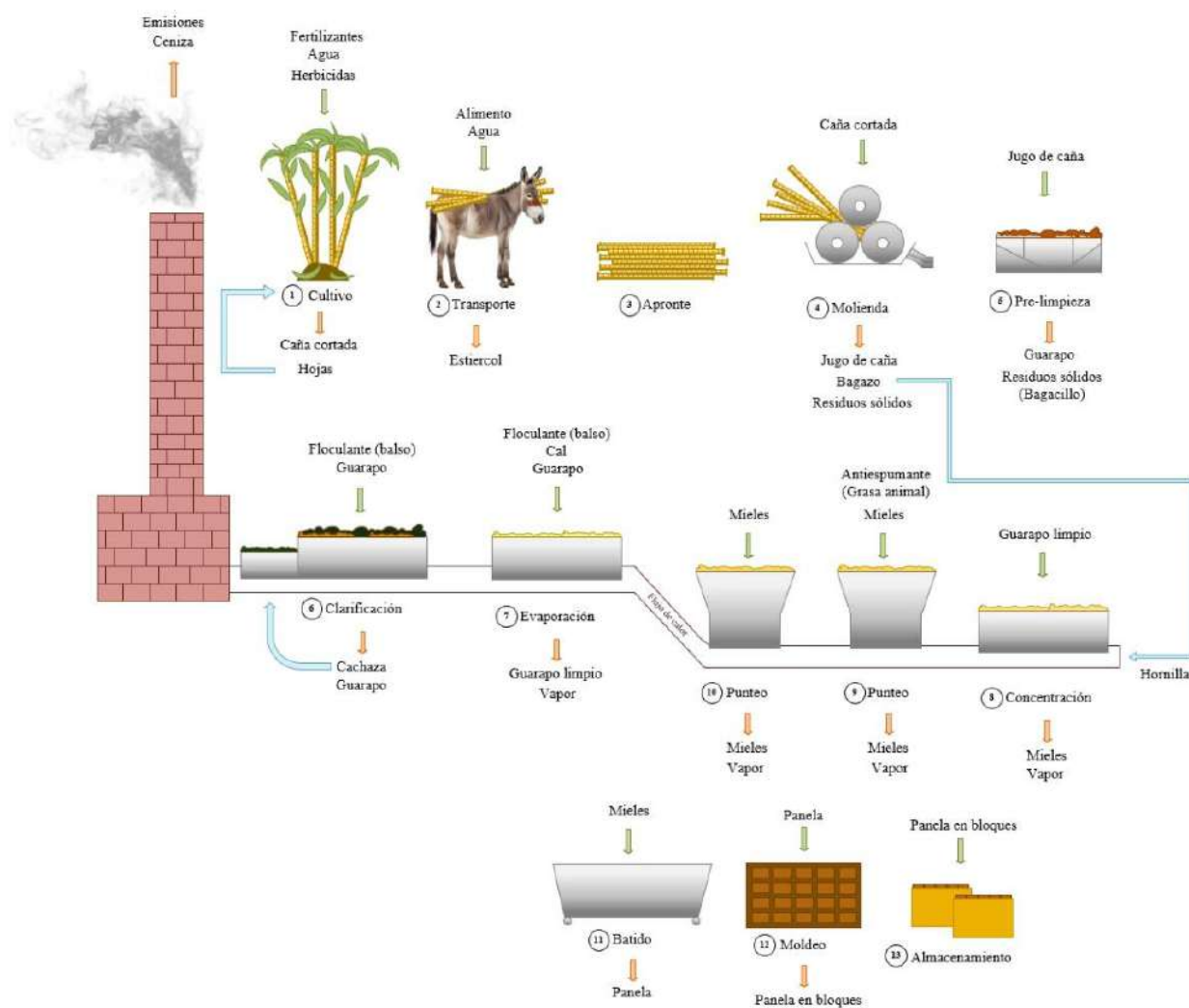
La producción de panela es un proceso que involucra varias operaciones secuenciales, que inician con la molienda de la caña, seguido de la prelimpieza y clarificación del jugo extraído. Posteriormente, se realiza la evaporación del agua y la concentración de las mieles, antes de proceder al punteo y batido. Al finalizar, la panela se moldea, se enfría y se prepara para su

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

empaque y embalaje, asegurando que llegue en óptimas condiciones al consumidor final (Osorio, 2007). A continuación, la Figura 6 presenta una ilustración gráfica que incluye los *inputs* y *outputs* de cada operación desde la etapa de cultivo hasta el almacenamiento.

Figura 6

Proceso productivo de la panela



Nota. Este diagrama se elaboró teniendo en cuenta la información recolectada de las unidades productivas incluidas en el estudio.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

7.1.4.1 Molienda. La caña apilada en la zona de apronte es procesada en un molino de extracción que separa el jugo de la fibra mediante compresión (ver Figura 7). Según Quezada (2007), para esta labor generalmente se utilizan molinos de tres masas, ajustados a velocidades de rotación entre 6 y 15 rpm. La velocidad de las masas está directamente relacionada con la cantidad de caña molida por hora y con la capacidad de extracción. Una alta velocidad de rotación supone mayor cantidad de caña molida por hora, sin embargo, también significa una pérdida en la capacidad de extracción generada por la disminución del tiempo que permanecen las cañas entre las masas del molino. Esto provoca que el jugo extraído no se escurra completamente al vacío entre las tres masas, sino que sea arrastrado por el bagazo que va saliendo.

Figura 7

Molienda de la caña. (a) zona de molienda UP5. (b) zona de molienda UP3



(a)



(b)

Por otra parte, Osorio (2007) asegura que una velocidad de rotación muy baja causa pérdidas de tiempo e incrementos en el torque, lo que puede ocasionar ruptura de los engranajes y

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

de los ejes. Por ello, se recomienda ajustar la velocidad entre 6 y 8 rpm, obteniendo buenos niveles de extracción (58 a 63%) sin sacrificar la capacidad de molienda y sin aumentar la potencia requerida.

Los productos resultantes de esta operación son el jugo de caña y el bagazo. el primero, es la materia prima que se destina a la producción de panela, mientras que el segundo se emplea como material combustible para la hornilla (Osorio, 2007). Dos de las cinco unidades productivas (UP1 y UP3) utilizan el bagazo como combustible inmediatamente después de su salida del molino, gracias a un sistema incorporado en la hornilla conocido como cámara de combustión Ward-Cimpa. Este sistema permite el uso del bagazo húmedo y ofrece mejores eficiencias energéticas en comparación con las hornillas Plana-Cimpa, tradicionales en los trapiches paneleros. Las unidades productivas restantes deben almacenar el bagazo en un sitio denominado bagacera y esperar entre tres y cuatro semanas antes de poder utilizarlo como combustible en la hornilla.

En cuanto a los impactos sobre los factores ambientales asociados al motor, cuyo funcionamiento depende principalmente de la energía eléctrica, pero cuenta con un sistema de respaldo a diésel, Ordoñez-Díaz y Rueda-Quiñónez (2017) señalan que el uso prolongado de dicho respaldo puede alterar la composición atmosférica debido a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), como óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, monóxido de carbono y material particulado.

7.1.4.2 Prelimpieza. La prelimpieza es el paso del proceso en el que el jugo crudo se limpia mediante un dispositivo (ver Figura 8) que utiliza la decantación natural y la gravedad para eliminar impurezas sólidas como tierra o lodo, y partículas livianas como bagacillo, hojas e

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

insectos (Quezada, 2007). Como lo describe Osorio (2007), este proceso, que incluye la remoción periódica de residuos acumulados y un mantenimiento constante del equipo, garantiza la calidad del jugo al evitar la fermentación y mejorar el color de la panela. Para la limpieza del jugo hay dos recipientes que funcionan bajo el mismo principio, el primero, más pequeño (sencillo), ubicado justo en donde cae el jugo recién extraído y el segundo, más grande (doble), entre la salida del primero y el fondo receptor que ya está sobre la línea de calor. A continuación, el productor de la UP1 describe el utensilio utilizado en este corto pero importante paso y da detalles sobre las tareas que se deben realizar:

... Se utiliza una pila sencilla en acero inoxidable y más adelante se utiliza una pila doble también en acero. Luego se viene el proceso de decantación de jugos, entre seis y doce horas se recogen los sedimentos, y se lavan los recipientes con agua y cepillo para evitar que los jugos se fermenten (UP1).

Figura 8

Dispositivo de prelimpieza. (a) dispositivo de UP2. (b) dispositivo de UP1



(a)

(b)

Anteriormente, los recipientes utilizados en este proceso se construían con ladrillo, cemento y cerámica para facilitar su limpieza. Sin embargo, en todas las unidades productivas visitadas, ahora se utilizan recipientes de acero inoxidable, lo que favorece la higiene del producto y aumenta la durabilidad del utensilio (Quezada, 2007).

7.1.4.3 Clarificación. El proceso de clarificación es llevado a cabo en la paila recibidora o descachazadora, donde se eliminan impurezas del guarapo como bagacillo, sustancias coloidales y sólidos solubles (ver Figura 9). La separación de las impurezas tiene lugar gracias al calor generado por la hornilla y la acción aglutinante de mucílagos naturales extraídos de plantas como el balso, que forman polímeros celulósicos capaces de aglomerar las partículas en suspensión (Osorio, 2007). Con una temperatura inferior a la de ebullición (94° C), los sólidos se agrupan

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

formando la cachaza, que es una masa viscosa y de color verdoso que flota sobre el jugo y se extrae manualmente usando una herramienta conocida como remellón (Quezada, 2007).

Figura 9

Proceso de clarificación. (a) proceso de clarificación UP1. (b) proceso de clarificación UP3



(a)

(b)

La cachaza se deposita en un recipiente llamado melasera, ubicado junto a la descachazadora y en dirección opuesta a los demás fondos, allí, continúa su cocción durante 8 a 10 horas, evaporando el agua y resultando en un líquido espeso y cremoso (UP1). El guarapo, ahora más limpio, desciende al siguiente fondo para iniciar el proceso de evaporación. Este traslado puede realizarse a través de tuberías o de forma manual, dependiendo del diseño e infraestructura del trapiche. En las unidades productivas visitadas, la cachaza se utiliza comúnmente como alimento para las mulas empleadas en el transporte de la caña y en algunas (UP1 y UP3) también se comercializa a un bajo costo con propietarios de lecherías y ganaderías locales.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

7.1.4.4 Evaporación y Concentración. Concluida la clarificación, se inicia la evaporación del agua para aumentar la concentración de azúcares en los jugos. En la última parte de la limpieza se adiciona cal de tipo alimenticio, con el fin de regular la acidez de los jugos a un valor de pH de 5,8 ° brix para prevenir la formación de azúcares reductores (panela seruda o melcochuda) y ayudar a la clarificación de los jugos (Osorio, 2007). En este fondo, las impurezas visibles de los jugos son significativamente menores a la del primer fondo de clarificación, sin embargo, también se utiliza el floculante (balso) para extraer manualmente las impurezas y devolverlas al fondo anterior. La evaporación del agua contenida en los jugos ocurre porque en este fondo la temperatura se eleva hasta los 96° C, permitiendo alcanzar la concentración de azúcares deseada para las siguientes etapas de cocción.

Figura 10

Línea de fondos. (a) línea de fondos UP2. (b) línea de fondos UP5



(a)



(b)

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

A medida que el proceso va avanzando, es decir, se van moviendo los jugos desde un fondo a los demás para concluir en la etapa de moldeo, se abre el paso para que el jugo que estaba en evaporación caiga al recipiente de concentración. En este recipiente la temperatura se eleva hasta los 120 °C debido a que es el fondo que más cerca se encuentra de la hornilla en donde se quema directamente el bagazo y se produce la combustión.

En cuanto a la distribución de los fondos, Quezada (2007) identifica tres sistemas de flujo de los jugos que afectan directamente la eficiencia operativa y la calidad del producto final: flujo normal, contraflujo y combinado.

En el flujo normal, que sigue la dirección de los gases, la descachazadora se ubica cerca de la hornilla y el fondo de punteo se encuentra al final de la línea. Este sistema reduce la cantidad de panela producida por hora debido a la menor temperatura en el fondo de punteo. Por otro lado, el sistema de contraflujo es el inverso del anterior. Su principal desventaja es el riesgo de que el producto se quemara, ya que la temperatura del fondo de punteo, al estar cerca de la hornilla, es más alta. Finalmente, el sistema combinado permite puntear con mayor frecuencia que los sistemas anteriores, lo que genera una mayor eficiencia en términos de volúmenes producidos. Esta distribución es la que se ilustró previamente en la Figura 6

7.1.4.5 Punteo, Batido y Moldeo. El proceso de punteo inicia cuando el guarapo concentrado alcanza el punto de miel. La consistencia y características apropiadas de la miel suelen ser determinadas por un operario experimentado, aunque un método más preciso es teniendo en cuenta la temperatura de ebullición (Quezada, 2007). En esta etapa, para evitar el derrame de las mieles por efecto de la ebullición se utilizan antiespumantes como grasas vegetales, aceites

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

comestibles y cebos. Sin embargo, cabe aclarar que el uso de cebos, por considerarse grasas saturadas, está prohibido por la resolución 000779 DE 2006 del Ministerio de la Protección Social, la cual establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que se deben cumplir en la producción y comercialización de panela.

La miel proveniente del segundo fondo de punteo se deposita en una batea de madera o acero inoxidable que se encuentra al interior del cuarto de moldeo, y por acción del batido constante y homogéneo se enfría hasta alcanzar una textura adecuada para formar las panelas (Osorio, 2007). Finalmente, el producto se vierte en moldes de madera húmedos denominados gaveras, donde se enfría hasta solidificarse, dando forma a los bloques de panela listos para empacar. Para distribuir el dulce en los moldes y asegurar que las panelas alcancen el volumen deseado, se utilizan dos palas de madera para manipularlo sobre las gaveras. Esto garantiza una distribución uniforme y que las panelas tengan un tamaño similar.

Osorio (2007) resalta la importancia de contar con cuarto de moldeo aislado de cualquier foco de insalubridad, recubierto para evitar el ingreso de suciedades o animales y con pisos y paredes en buenas condiciones con el fin de evitar la acumulación de aguas residuales que tienen un alto potencial corrosivo. Únicamente dos de las cinco unidades productivas (UP1 y UP3) cumplen con este requerimiento, que mejora las condiciones higiénico-sanitarias de la panela, favorece las condiciones de trabajo y aumenta la calidad de la panela.

Figura 11

Batido y moldeo. (a) proceso de moldeo UP4. (b) proceso de batido UP1



(a)

(b)

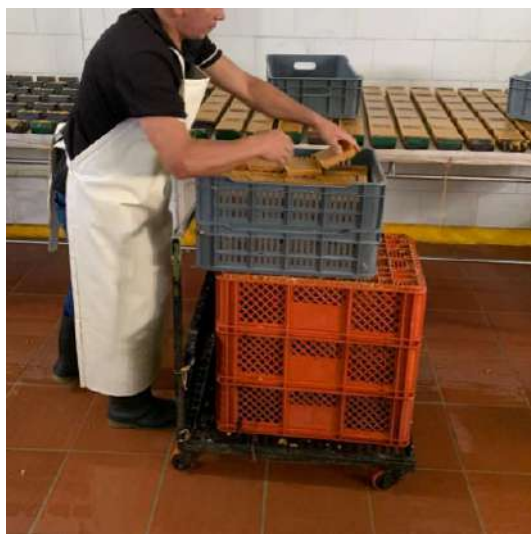
7.1.4.6 Almacenamiento. El procedimiento final de la producción de panela es el empaclado y almacenamiento (ver Figura 12). Según Osorio (2007), la panela es un producto con cualidades higroscópicas, es decir, que absorbe o pierde humedad por su permanencia en el ambiente. Esto significa, que una vez se realice el respectivo enfriamiento de la panela, esta debe ser empaçada o puesta en unas condiciones ambientales propicias en donde la humedad no supere el 7%, evitando el aumento de azúcares reductores y descartando el eventual crecimiento de microorganismos que arruinen las propiedades fisicoquímicas del producto. Tres de las cinco unidades productivas visitadas (UP2, UP4 y UP5) empaacan el producto directamente en cajas de cartón prefabricadas, según Osorio (2007) esto es bueno dado que este material evita que la panela absorba humedad del ambiente y además es reciclable. Por su parte, las dos restantes (UP1 y UP3) acomodan el producto en canastillas que posteriormente son recogidas por los comerciantes y

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

llevadas a empacadoras en donde cada panela se envuelve con plásticos termoencogibles que preservan la vida útil del producto y protegen sus características organolépticas.

Figura 12

Proceso de almacenamiento. (a) almacenamiento UP3. (b) almacén UP2



(a)



(b)

Las unidades productivas incluidas en el estudio únicamente abarcan los eslabones de abastecimiento y producción de panela, dejando la actividad de comercialización a terceros. Esta situación genera cierto malestar entre los productores ya que consideran que esta última es la mejor remunerada. A continuación, una declaración de uno de los productores describiendo la situación:

...la parte de comercialización creería yo que es la más rentable en este negocio, como se dice, unos trabajan para que otros hagan plata. Pero también uno en esta situación tan absorbente de tiempo, si puede cantar no puede silbar (UP1).

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

Después de examinar el proceso productivo de la panela, que abarca desde el cultivo de la caña de azúcar hasta la comercialización derivada a terceros, en el apéndice C, se presenta un *Value Stream Mapping* (VSM) del proceso. Este mapa de flujo de valor ofrece información cuantitativa relevante como los tiempos de ciclo, la capacidad en cada proceso, el lead time, además de la facilidad de identificar desperdicios y oportunidades de mejora. Es importante señalar que este mapa de flujo de valor se presenta como un resumen del proceso productivo, reflejando el estado actual de una de las unidades productivas en términos de tiempos y lotes de producción. Esta representación gráfica y numérica es relevante para la investigación, ya que permite identificar el cuello de botella en el proceso y detectar los desperdicios que pueden ser corregidos mediante la aplicación de herramientas *Lean* que se propondrán más adelante.

A continuación, en la

Tabla 6 se presentan los datos utilizados para elaborar el mapa de flujo de valor. La información recopilada para utilizar la herramienta Lean en función de reconocer el estado actual de las unidades productivas provino de la UP1, esta información puede corresponder total o parcialmente a las demás unidades productivas, teniendo en cuenta que las condiciones de producción son similares. La información recopilada para este propósito se obtuvo considerando la disposición y voluntad del productor de la UP1, ya que, al tratarse de datos más sensibles o detallados sobre su proceso productivo, las demás unidades productivas contribuyeron con información, pero mucho menos específica. Es importante señalar que, durante la actividad de socialización, descrita en el apéndice D, el mapa de flujo de valor (VSM) fue presentado a los

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

demás productores, quienes emitieron un concepto favorable respecto a la certeza con la que este diagrama refleja sus operaciones individuales.

Tabla 6

Datos para VSM

Variable	Resultado	Unidades
Jornada laboral	16	Horas
tiempo de almuerzo	1	horas
tiempo de descanso	7	horas
Numero de turnos	3	diario
Días lab. por mes	12	días
Demanda mensual	54000	Kilogramos
Tiempo disponible	24	Horas
Tiempo disponible	1440	Min por día
Tiempo disponible	86400	Seg por día
Demanda diaria	4500	Kg por día
<i>Takt time</i> Seg	0,8	Seg/ Kg
<i>Takt Time</i> Min	120	Min cada 150Kg

De la información recopilada para elaborar el mapa de flujo de valor, destaca la estrategia que se usa para mantener una disponibilidad de tiempo continua durante los seis o siete días que dura la molienda. Esta continuidad se logra mediante la rotación de labores, estableciendo turnos de 6 horas de trabajo seguidas por 3 horas de descanso, de manera ininterrumpida, en las diferentes estaciones. Así, cada operario resulta trabajando aproximadamente 16 horas y descansando 8 horas al día. En total, de las 144 horas que dura la molienda, en promedio, cada trabajador suele descansar 48 horas, lo que equivale al 33% del tiempo total.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

Si bien la situación descrita anteriormente puede parecer una sobrecarga para el personal, existen algunos factores atenuantes inherentes al proceso de producción de panela. En primer lugar, cuando el trapiche comienza a operar, no se detiene hasta que se haya molido y cocinado todo el jugo resultante. Esto se debe a que la hornilla, debido a su alto consumo de energía, no puede ser interrumpida sin desperdiciar su funcionamiento continuo. Por otro lado, en las distintas estaciones de trabajo, tanto los operarios como el dueño de la molienda, han identificado empíricamente cuáles tareas requieren mayor esfuerzo físico. De esta manera, se organizan para equilibrar las cargas de trabajo asegurándose de que ningún operario tenga que realizar tareas físicamente demandantes durante más de una jornada de seis horas consecutivas. Para finalizar, la molienda dura entre seis y siete días y se lleva a cabo, como máximo, dos veces al mes, por lo que los días trabajados bajo condiciones realmente exigentes, en materia de esfuerzo físico, son únicamente 12 y en dos momentos diferentes que suelen estar separados por al menos una semana.

Con relación al mapa de flujo de valor, se observó una considerable acumulación de inventario tanto en la operación de molienda como en la de limpieza y cocción, que comprende todas las subtarefas sobre la línea de calor mencionadas anteriormente. Este exceso de inventario se debe principalmente a que el *Uptime* de la operación de limpieza y cocción es del 100%, es decir, aunque esta estación de trabajo se mantiene operativa en todo momento, no tiene la capacidad de procesar al mismo ritmo que el molino. Esto se puede corroborar considerando que el *Uptime* del molino es del 70% y que, en la práctica, debe ser encendido y apagado deliberadamente durante toda la molienda.

7.2 Principales Problemáticas del Sector

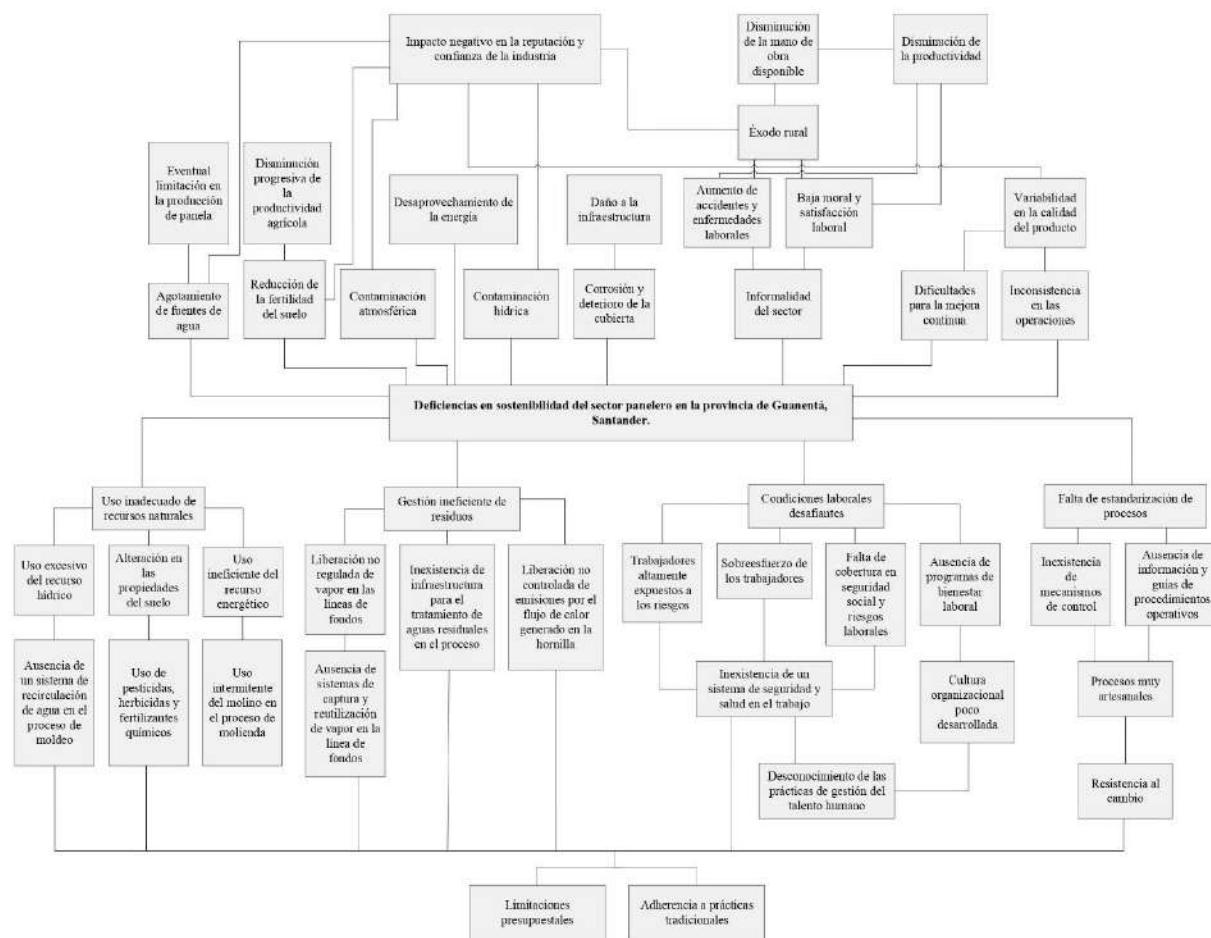
Para abordar las problemáticas y áreas de mejora en la industria panelera de la provincia de Guantán, Santander, fue necesario llevar a cabo un análisis detallado de las causas subyacentes que inciden de manera significativa en su desempeño sostenible. Este análisis permitió identificar los factores que influyen en diversos aspectos de la producción de panela y estableció una base para desarrollar soluciones. Es importante destacar que esta sección responde plenamente al tercer objetivo específico, el cual busca caracterizar el sector, detallando la producción, los métodos empleados y las problemáticas relacionadas con la sostenibilidad. Así mismo, contribuye al cumplimiento del cuarto objetivo específico, al analizar y presentar la información recolectada directamente de las unidades productivas, que posteriormente será usada para ofrecer recomendaciones a los productores. Las causas, que fueron identificadas con el apoyo de la caracterización previa, la observación directa de los procesos, el acercamiento con los productores y la revisión de datos complementarios, están estrechamente relacionadas con cada uno de los pilares de la sostenibilidad: el económico, centrado en los procesos y la productividad; el social, relacionado con las condiciones laborales de los trabajadores del sector; y el ambiental, referente al impacto de estas unidades productivas sobre el medio ambiente.

A continuación, en la Figura 13, se presenta un diagrama de árbol del problema que ilustra las causas de la problemática general y sus posibles consecuencias, resaltando la necesidad de implementar soluciones efectivas que no solo optimicen la productividad, sino que también promuevan la sostenibilidad y el bienestar en este sector clave.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

Figura 13

Árbol del problema sector panelero



Según se observa, este esquema pone en evidencia cómo diversos factores interrelacionados contribuyen a la deficiencia en sostenibilidad del sector de estudio, abarcando como causas principales la gestión ineficiente de recursos naturales y residuos, las condiciones laborales desafiantes y la falta de estandarización de procesos. Los problemas identificados no solo impactan negativamente la productividad y la calidad de la producción, sino que también afectan el entorno social y ambiental, generando un ciclo de consecuencias que recrudecen la situación del sector panelero.

En las secciones siguientes, se abordarán detalladamente las causas primarias identificadas en este análisis, con el fin de comprender en profundidad las raíces de estos desafíos para, más adelante, explorar posibles vías para su solución desde la aplicación de herramientas *Lean*.

7.2.1 Uso Inadecuado de los Recursos Naturales

El uso inadecuado de los recursos naturales es una de las causas primarias que afecta la sostenibilidad del sector panelero. Este problema se manifiesta principalmente en tres áreas críticas: el uso excesivo del recurso hídrico, la alteración de las propiedades del suelo debido al empleo de prácticas agrícolas no sostenibles, y el uso ineficiente del recurso energético.

En el proceso de producción de panela, el agua juega un papel esencial en la etapa de moldeo, donde se utiliza para humedecer los moldes y enfriar la panela hasta su solidificación. A pesar de esto, la ausencia de un sistema de recirculación de agua en las unidades productivas visitadas conduce a un uso excesivo y, a menudo, innecesario de este recurso. Durante la observación directa de los procesos se evidenció que el agua utilizada en el enfriamiento es desechada sin ningún tipo de reutilización (ver Figura 14), lo que no solo representa una ineficiencia en el uso del recurso hídrico, sino que también aumenta la presión sobre las fuentes de agua locales. Esta situación, a largo plazo, podría llevar a una sobreexplotación de las fuentes hídricas, afectando no solo la disponibilidad de agua para la producción, sino también el equilibrio ecológico de la región.

Figura 14

Uso de agua en el proceso de moldeo. (a) y (b) pertenecen a UP3



(a)

(b)

Por otro lado, la alteración de las propiedades del suelo debido al uso intensivo de pesticidas, herbicidas y fertilizantes químicos representa otra causa significativa de la problemática. Estas sustancias son comúnmente empleadas para maximizar la productividad y proteger los cultivos de caña de azúcar de plagas como el barrenador del tallo (*Diatraea saccharalis*) y otras enfermedades. Sin embargo, su uso desmedido y sin un manejo adecuado puede llevar a una degradación progresiva del medio ambiente, afectando la fertilidad y la composición del ecosistema del suelo, e incluso provocando alteraciones climáticas (Palaniappan y Annadurai, 1999).

Finalmente, el uso ineficiente de la energía, particularmente debido al funcionamiento intermitente del molino en el proceso de molienda, también contribuye de manera parcial a las deficiencias del sector en el aspecto ambiental. Este problema surge cuando se produce una

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

acumulación de jugos en los fondos que obliga a detener y reiniciar el molino de manera recurrente, lo que impide que el proceso de molienda sea continuo, generando un consumo adicional de energía y acelerando progresivamente el desgaste de los equipos, lo que a su vez puede incidir en un futuro aumento de costos de mantenimiento o en la reducción de la vida útil de la maquinaria.

Aunque actualmente no es posible eliminar completamente esta causa debido a las limitaciones inherentes al proceso, es crucial considerar su impacto a largo plazo en la sostenibilidad del sector, pues la acumulación de estos pequeños desperdicios de energía podría contribuir a mayores costos operativos y una huella ambiental más grande.

7.2.2 Gestión Ineficiente de los Residuos

Otra de las causas principales que afecta la sostenibilidad del sector panelero a través de su impacto en el medio ambiente es la gestión ineficiente de los residuos, un problema que se manifiesta en varias áreas clave del proceso productivo, incluyendo la liberación de vapor, agua y emisiones.

En primer lugar, la liberación no regulada de vapor en las líneas de fondos durante la cocción del jugo de caña es una de las principales preocupaciones. En todas las unidades productivas visitadas, este vapor es liberado sin control ni reutilización (ver

Figura 15), lo que no solo representa un desperdicio de energía, sino que también puede contribuir a la contaminación atmosférica y a la pérdida de eficiencia en el proceso.

Figura 15

Flujo de vapor. (a) pertenece a UPI. (b) pertenece a UP3



(a)

(b)

El manejo de las aguas residuales generadas a lo largo del proceso productivo también plantea un reto considerable en la gestión de desechos. Tras su uso en diversas etapas, el agua queda contaminada con residuos que, sin un tratamiento adecuado, pueden afectar las fuentes hídricas cercanas, poniendo en riesgo tanto la calidad del agua como el entorno natural.

Durante las visitas a las unidades productivas, se detectó que el agua residual se descarga directamente al suelo, donde sigue su curso por canales hasta llegar a quebradas cercanas (ver

Figura 16). Este enfoque en el manejo del agua puede estar influido, en parte, por la ausencia de costos asociados al uso de agua de fuentes naturales aledañas, lo que puede llevar a que los productores mantengan prácticas que no optimicen el uso de este recurso.

Figura 16

Aguas residuales. (a) pertenece a UP3. (b) pertenece a UP1



(a)

(b)

Finalmente, la liberación no controlada de emisiones generadas en la hornilla constituye otra manifestación de la gestión ineficiente de residuos. Este flujo de gases (ver Figura 17), aunque es una parte inherente al proceso de producción, puede contribuir a la contaminación del aire, afectando tanto al medio ambiente como a la salud de los trabajadores y las comunidades vecinas.

Figura 17

Flujo de emisiones. (a) pertenece a UP4. (b) pertenece a UP5



(a)

(b)

7.2.3 Condiciones Laborales Desafiantes

La tercera causa principal que afecta la sostenibilidad del sector panelero está relacionada con las condiciones laborales desafiantes a las que se enfrentan los trabajadores de esta industria. Estas condiciones podrían tener un impacto profundo en la productividad, la seguridad, y el bienestar de los empleados, lo que a su vez repercute en la eficiencia general y en la sostenibilidad del sector.

Una de las ramas más incidentes de este problema, que se evidenció en la totalidad de las unidades productivas, es la falta de un sistema de gestión de la seguridad y salud en el trabajo (SG-SST). De acuerdo con la Resolución 0312 de 2019 del Ministerio del Trabajo, que establece los estándares mínimos del SG-SST para empleadores y contratantes, y el Decreto 768 de 2022, que clasifica las actividades productivas del sector panelero en niveles de riesgo III y IV para cultivo

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

y producción, respectivamente, se constató que las unidades productivas analizadas no cumplen con ninguno de los requisitos mínimos exigidos por la ley.

Durante las visitas realizadas, se observaron diversas deficiencias en aspectos clave del entorno laboral, como el uso limitado de elementos de protección personal, la falta de higiene ocupacional y la ausencia de medidas efectivas para la prevención de riesgos. También se identificaron problemas relacionados con la ergonomía de los trabajadores, como posturas inadecuadas, movimientos repetitivos y la carga excesiva de peso (ver Figura 18), lo que incrementa significativamente el riesgo de lesiones. Asimismo, se evidenciaron otras oportunidades de mejora, como la falta de delimitación de áreas de trabajo, la señalización deficiente de los espacios y la desorganización de las herramientas. Estas carencias, mencionadas en la resolución, subrayan la necesidad urgente de mejorar las condiciones de seguridad y salud en estas unidades productivas.

Figura 18

Posturas inadecuadas. (a) pertenece a UP3. (b) pertenece a UPI



(a)



(b)

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

Otra rama crítica es la escasa capacitación y desarrollo de habilidades entre los trabajadores. En muchas de las unidades productivas, se observó que la mayoría de los empleados no reciben formación continua ni actualizaciones sobre prácticas de producción más eficientes o sostenibles. Esta falta de capacitación limita las posibilidades de mejora en los procesos, ya que los trabajadores carecen de conocimientos y habilidades que podrían contribuir a una mayor productividad y a una gestión más responsable de los recursos.

Finalmente, la inestabilidad laboral y la falta de acceso a beneficios sociales son factores que agravan las condiciones laborales desafiantes en el sector. Los trabajadores no cuentan con contratos formales ni acceso a seguridad social, pensiones o seguro médico, lo que genera una situación de vulnerabilidad económica y social. Esta inestabilidad no solo afecta el bienestar de los trabajadores y sus familias, sino que también crea un ambiente de incertidumbre que puede disminuir el compromiso y la eficiencia en el trabajo.

7.2.4 Falta de Estandarización de Procesos

La falta de estandarización de los procesos en el sector panelero es otra causa significativa que impacta negativamente la sostenibilidad y eficiencia de la producción. Esta problemática se manifiesta en diversas áreas, desde la variabilidad en la calidad del producto final hasta las ineficiencias operativas que derivan en desperdicios de recursos y tiempos de producción prolongados. Sin un conjunto de procedimientos definidos y estandarizados, cada unidad productiva tiende a desarrollar su propio enfoque de trabajo, lo que no solo genera disparidad en los resultados, sino que también dificulta la implementación de mejoras continuas y la adopción de prácticas sostenibles a lo largo del tiempo.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

En primer lugar, una de las ramas más evidentes de este problema es la ausencia de mecanismos de control precisos en el proceso de producción. Por ejemplo, no existen métodos estandarizados para medir variables críticas como la temperatura o el pH durante las diferentes etapas de transformación del jugo de caña en panela. Esto significa que decisiones cruciales, como el momento exacto para transferir el líquido de un fondo a otro, se basan en criterios subjetivos o en la experiencia personal, en lugar de en datos objetivos que aseguren la consistencia y la calidad del producto final. De hecho, estas prácticas se observan incluso en etapas anteriores del proceso, como el cultivo de la caña, donde los productores suelen determinar la madurez de la planta basándose en los sentidos y la experiencia, en lugar de utilizar indicadores científicos y verificables (Quezada, 2007).

En segundo lugar, la falta de guías operativas formales contribuye a una variabilidad significativa en las prácticas de trabajo. En las unidades productivas, cada empleado tiende a realizar sus tareas según las costumbres y tradiciones transmitidas de generación en generación, sin el apoyo de procedimientos escritos o medidas exactas. Esta situación genera inconsistencias en la ejecución de las tareas diarias y dificulta la implementación de mejoras que puedan aumentar la eficiencia y la calidad de la producción.

La combinación de estos factores no solo limita la capacidad de los productores para mejorar la competitividad de su producto en el mercado, sino que también aumenta el riesgo de errores y desperdicios. Sin una estandarización adecuada, es difícil asegurar que todos los procesos se realicen de manera eficiente y uniforme, afectando negativamente la sostenibilidad y la viabilidad económica a largo plazo del sector panelero.

7.3 Oportunidades de Implementación de Herramientas *Lean*

En la búsqueda de alternativas adecuadas para dar posible solución a las problemáticas del sector panelero, la implementación de herramientas *Lean* se presenta como una estrategia prometedora. Este enfoque, reconocido por su capacidad para optimizar procesos y minimizar desperdicios, ofrece respuestas específicas a las deficiencias actuales y se relaciona directamente con el cuarto objetivo específico, en el que se busca proponer recomendaciones a los productores fundamentadas en la aplicación de herramientas *Lean*.

En las subsecciones siguientes, se analizará cómo un grupo de herramientas *Lean* puede abordar las problemáticas identificadas, de manera transversal y específica, considerando el estudio previo de la literatura y la consulta con expertos en la materia. Cada sección se enfocará en una herramienta en particular, detallando cómo su aplicación puede mejorar y hacer más sostenible las operaciones, aliviando el impacto de los retos existentes y fortaleciendo el desempeño general del sector.

7.3.1 Herramientas *Lean* de Aplicación Transversal

La implementación de herramientas *Lean* de aplicación transversal ofrece una orientación hacia la recolección y análisis de información clave en el proceso de producción, debido a que no están diseñadas para abordar problemáticas específicas, sino que proporcionan un marco general para recopilación de datos y la evaluación continua del rendimiento.

Al integrar estas herramientas en el proceso, se establece una base sólida para la estandarización y la construcción de un sistema de información, facilitando así una mejora continua en la operación.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

A continuación, se describen las herramientas *Lean* que cumplen con estas características.

7.3.1.1 *Smart and Sustainable Value Stream Mapping (VSM)*. La propuesta se centra en la implementación de un SSVSM, una herramienta clave para mejorar procesos, reducir el desperdicio, mejorar la sostenibilidad y, en última instancia, aumentar la competitividad y viabilidad a largo plazo en un entorno empresarial que está cambiando rápidamente (Batwara et al., 2024). Aplicada al contexto panelero, esta herramienta permitiría mapear tanto el flujo de materiales como la información relevante desde la recepción de la caña hasta la obtención del producto terminado. Esto facilitaría la identificación de cuellos de botella específicos, desperdicios propios del proceso y oportunidades de mejora alineadas con los pilares del triple bottom line (económicos, sociales y ambientales), además de un componente tecnológico.

La implementación del SSVSM sería de gran utilidad para identificar ineficiencias operativas típicas del sector, como la acumulación de tiempos improductivos debido a la gestión de la línea de fondos, así como detectar actividades que no aportan valor, por ejemplo, la duplicación de esfuerzos en el transporte de la caña desde la zona de apronte hasta la molienda. Aunque estas observaciones pueden percibirse a simple vista, el objetivo de aplicar esta herramienta es validar estos hallazgos mediante la integración de datos cuantitativos, asegurando un análisis más riguroso y fundamentado.

El uso del SSVSM facilitaría también la recopilación de información para la estandarización de procesos, un aspecto fundamental para asegurar la consistencia en la producción, lo que actualmente se identificó como una problemática. Esta estandarización sería un avance significativo no solo para disminuir la variación en la calidad de la panela, sino que también

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

podría facilitar en gran medida las evaluaciones de desempeño en cada dimensión de la sostenibilidad y la construcción de un sistema de información que más adelante permita definir un estado futuro ideal del sistema, en el cual se minimicen los desperdicios, se maximicen los recursos y se logre el bienestar laboral.

Por otro lado, sería bueno tomar ventaja de los resultados de implementación de esta propuesta como una oportunidad para analizar la viabilidad de un reaprovechamiento de los subproductos, como la cachaza, lo que fomentaría la economía circular dentro del proceso productivo de la panela.

Finalmente, la aplicación del SSVSM promueve la participación activa de los trabajadores, quienes aportan su conocimiento del proceso diario, lo que no solo enriquece el análisis, sino que también fomenta un entorno colaborativo orientado a la mejora continua. Con la información obtenida a través de esta herramienta, se sientan las bases para la construcción de un sistema de trabajo más eficiente, estándar y sostenible.

7.3.1.2 Key Performance Indicators (KPI's). Los KPI's son herramientas fundamentales para evaluar el éxito de las mejoras implementadas en una organización. En el marco de este proyecto se explora el uso general de los KPI's como una herramienta para la verificación continua de la efectividad de las iniciativas y ajustes realizados. Estos indicadores proporcionan métricas específicas y cuantificables que permiten estimar de manera objetiva los resultados obtenidos en relación con las metas establecidas.

En la producción de panela, algunos KPI's clave que se podrían establecer para medir el desempeño productivo y sostenible incluyen la eficiencia energética ($\frac{kWh}{Kg \text{ panela}}$), el tiempo de

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

ciclo de producción ($\frac{h}{Kg\ panela}$), la productividad en diferentes etapas del proceso ($\frac{outputs}{inputs}$), entre muchos otros.

Para asegurar una evaluación precisa del desempeño, es crucial introducir herramientas de medición que permitan cuantificar estos indicadores de manera efectiva, como por ejemplo básculas, detector de gases, peachímetro, termómetros, entre otros. Estas herramientas proporcionan los datos necesarios para analizar el funcionamiento del proceso y evaluar la efectividad de las mejoras implementadas. El uso de sistemas de medición adecuados facilita el seguimiento continuo del proceso, permite realizar ajustes informados y garantiza que los objetivos sean alcanzados.

7.3.1.3 Trabajo Estándar. La propuesta de implementar el trabajo estándar en las operaciones del sector busca resaltar la importancia de establecer procedimientos documentados que permitan reducir la variabilidad para garantizar resultados consistentes y de calidad (Wilson, 2010). Esto es especialmente relevante en el contexto de la producción de panela, puesto que tal y como lo mencionan los productores, la variabilidad puede afectar tanto la calidad del producto como la satisfacción del cliente (Rodríguez, 2010).

Un aspecto clave de esta implementación sería la estandarización de las medidas de ingredientes críticos, como el aglutinante, el antiespumante y el ingrediente regulador de pH. Estas especificaciones permitirían verificar que cada lote de panela cumpla con los mismos parámetros de calidad y, por otro lado, facilitarían la capacitación de nuevos empleados, quienes podrán seguir un protocolo claro.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

Asimismo, es fundamental establecer tiempos precisos para las distintas etapas del proceso, como la duración de la exposición al calor en los fondos y las temperaturas específicas que deben mantenerse en cada fase. Por ejemplo, la definición de un tiempo estándar para la cocción de los jugos puede prevenir el sobrecalentamiento, que podría afectar el sabor y la textura de la panela (Quezada, 2007).

Toda esta información debe ser integrada en un instructivo detallado que funcione como guía para los trabajadores. Este documento no solo facilitaría la adherencia a los procedimientos estandarizados, sino que también podría incluir ilustraciones y ejemplos prácticos que reflejen las particularidades de cada unidad productiva, asegurando un proceso de producción más controlado y homogéneo.

7.3.1.4 A3 Report. El A3 report es una herramienta propia de la metodología Lean, diseñada para abordar y resolver problemas de manera estructurada y efectiva. En el contexto de la producción de panela, su implementación permite documentar, analizar y solucionar los desafíos específicos que surgen a lo largo del proceso productivo a través de la recopilación de información clave que puede ser identificada en periodos cortos de tiempo (Pajuelo et al., 2023). Por ejemplo, podría aplicarse para abordar la gestión de residuos, proponiendo soluciones sostenibles como la reutilización o el compostaje de la cachaza.

Esta metodología también ayudaría a mejorar las condiciones laborales al detectar problemas ergonómicos, como el esfuerzo físico excesivo, sugiriendo cambios específicos para reducir la fatiga del personal. Adicionalmente, podría emplearse para identificar oportunidades de

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

optimización en el uso de recursos, como el consumo de agua en el proceso de moldeo o el gasto energético en la molienda, orientando acciones hacia un manejo más sostenible.

Este formato facilita la identificación de problemas y la planificación de soluciones en un solo documento, permitiendo que todos los involucrados en la producción tengan una visión clara y concisa de los problemas identificados, las causas raíz, y las acciones correctivas necesarias.

Es importante resaltar que esta herramienta va más allá de ser solo una técnica; se trata de una metodología que orienta el proceso de análisis y solución de problemas. Su uso facilita la identificación precisa de ideas y problemáticas, permite aclarar conceptos, y obtener una visión más nítida tanto de las dificultades como del estado actual de las unidades productivas.

7.3.1.5 Herramientas de Diagnóstico. Las herramientas de diagnóstico son fundamentales para comprender y evaluar el estado actual de los procesos. En la producción de panela, su aplicación resulta crucial para detectar ineficiencias, analizar las causas de problemas recurrentes y establecer planes de acción basados en datos concretos.

El uso de herramientas como el Diagrama de Ishikawa, los Análisis de Pareto y los 5 Porqués, entre otros, facilita la identificación de las causas raíz de problemas en la línea de producción. Por ejemplo, si se observa una disminución en la calidad del producto final, estas herramientas pueden ayudar a desglosar el problema y determinar si se debe a variaciones en la temperatura, a cantidades incorrectas de algún ingrediente, o a problemas con la maquinaria.

El diagnóstico basado en datos proporciona una visión objetiva del proceso, permitiendo tomar decisiones informadas que pueden mejorar aspectos como la eficiencia en el uso de recursos,

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

la calidad de la panela producida y la seguridad en el entorno laboral, asegurando que el proceso evolucione hacia una mayor sostenibilidad y productividad.

7.3.1.6. Sustainable Manufacturing. La implementación del enfoque de manufactura sostenible puede considerar simultáneamente las esferas económicas, ambientales y sociales (Haapala et al., 2013) en el proceso de producción de panela. Esta propuesta busca optimizar el uso de recursos locales, como la caña de azúcar y sus subproductos, para garantizar que los procesos productivos minimicen los impactos ambientales negativos, conserven la energía y los recursos naturales, y que además sean seguros para los empleados y demás grupos de interés (Departamento de Comercio de los Estados Unidos (DOC), 2011).

Por ejemplo, las unidades productivas podrían implementar técnicas como la de 3R para el reciclaje de residuos generados durante la producción, como la cachaza, que puede ser utilizada como fertilizante o incluso se podría pensar como materia prima para la generación de nuevos productos. Asimismo, otro ejemplo aplicable es la integración de indicadores ambientales y sociales, como la medición de emisiones durante la quema de bagazo o la mejora en las condiciones de trabajo de los operarios, que ayudaría a orientar las decisiones hacia prácticas sostenibles que también favorezcan el bienestar de los trabajadores.

7.3.2 Herramientas Lean de Aplicación Específica

Las herramientas *Lean* de aplicación específica están diseñadas para abordar desafíos puntuales dentro del proceso de producción, proporcionando soluciones adaptadas a problemas concretos. A diferencia de las herramientas de uso transversal, que ofrecen un marco general para

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

la mejora continua, estas herramientas se implementan para responder a necesidades identificadas en áreas específicas del proceso, permitiendo un enfoque más dirigido y efectivo.

A continuación, se detallan las herramientas *Lean* que se han seleccionado para su aplicación en situaciones particulares dentro de la producción de panela, con el fin de optimizar cada aspecto relevante y resolver los problemas identificados.

7.3.2.1 *Kaizen*. Con el objetivo de optimizar las operaciones y fomentar prácticas sostenibles en el sector panelero, la filosofía *Kaizen* ofrece una aproximación valiosa basada en la mejora continua y la participación de todos los miembros de la organización. Esta filosofía, que promueve pequeños cambios incrementales y constantes, se alinea perfectamente con la necesidad de abordar las carencias identificadas en las operaciones.

En esta sección, se explorarán las propuestas generadas bajo el enfoque de *Kaizen*, detallando cómo estas pueden contribuir a una transformación gradual y sostenida.

7.3.2.1.1 *Diseño e Implementación de un Sistema de Recolección y Recirculación de Agua*. En el marco de la generación de propuestas para abordar el uso inadecuado de los recursos naturales en el sector panelero, se inicia con el diseño e implementación de un sistema de recolección y recirculación de agua. Esta propuesta se enfoca en mitigar el impacto ambiental asociado al uso excesivo de agua, particularmente en el proceso de moldeo, una problemática crítica identificada en el análisis previo.

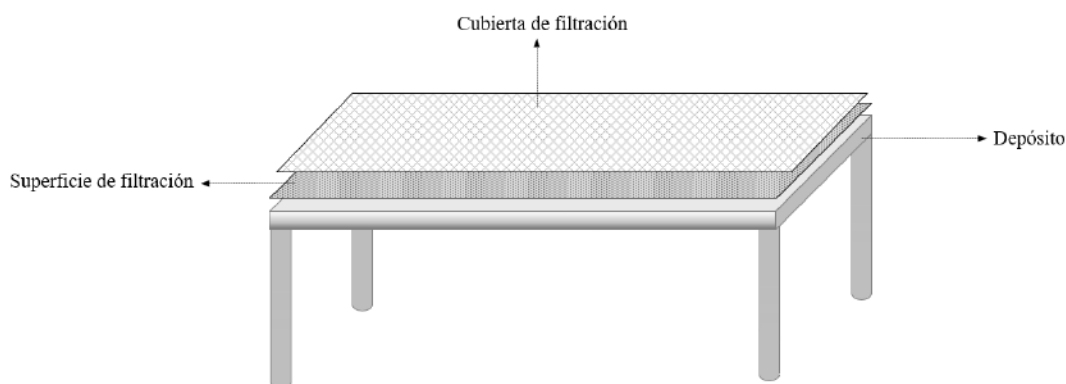
El sistema propuesto, plasmado en un boceto en la Figura 19, consiste en una mesa con una superficie equipada con agujeros (superficie de filtración), que complementa la función del

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

material que recubre la mesa para evitar la acumulación de agua (cubierta de filtración), y un depósito diseñado para recolectar el agua utilizada durante el proceso.

Figura 19

Boceto mesa con depósito



El objetivo se estructura en evaluar la viabilidad de reutilizar el agua recolectada de manera cíclica para el mismo proceso, teniendo en cuenta que es indispensable contar con la participación de un profesional que pueda garantizar la inocuidad a través de un análisis de microorganismos. En caso de que no sea posible reutilizar el agua en el proceso de moldeo, se considerará su reutilización en actividades auxiliares, como el lavado de fondos y espacios o en la preparación de otros subproductos.

Esta iniciativa busca no solo reducir el consumo de agua, sino también optimizar su uso, contribuyendo así a una mayor sostenibilidad en las operaciones del sector.

7.3.2.1.2 Control Biológico y Compostaje. Con el propósito de preservar la fertilidad y estructura del suelo, esta subsección presenta dos propuestas que buscan disminuir el impacto

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

ambiental en el sector panelero: el uso del control biológico y el compostaje como alternativa a los agroquímicos.

En primer lugar, se propone a los productores de la región el explorar, como agremiación, la viabilidad de implementar el control biológico como una alternativa a los pesticidas convencionales para manejar la plaga del barrenador de tallo. El control biológico se basa en el uso de organismos vivos o sus metabolitos, como depredadores, parásitos o patógenos, para reducir la población de plagas de manera natural (Badii y Abreu, 2006), ofreciendo una solución sostenible que reduce la dependencia de químicos y minimiza la alteración de las propiedades del suelo.

Por otro lado, la adopción del compostaje también se presenta como estrategia para reemplazar los fertilizantes químicos en el cultivo de caña, y se trata de convertir los residuos orgánicos en un abono natural. Este proceso no solo reduce la dependencia de fertilizantes sintéticos, que pueden tener efectos negativos a largo plazo, sino que también mejora la estructura del suelo, aumenta su capacidad para retener agua y nutrientes, y fomenta la actividad microbiana esencial para un cultivo saludable sin sustancias contaminantes (De Santos y Urquiaga, 2013).

Otros autores, como Quiroz y Pérez (2013), han investigado la implementación de la cachaza, un subproducto derivado de la caña de azúcar, como compost en suelos dedicados al cultivo de caña. En su estudio, concluyeron que el uso de cachaza en forma de compost ofrece beneficios significativos para la calidad del suelo, mejorando sus propiedades físicas, químicas y biológicas, así como su estructura, la capacidad de retención de agua y la actividad microbiológica.

La implementación de esta alternativa podría presentarse como una oportunidad para empezar a fomentar la economía circular en el proceso de producción de panela, transformando

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

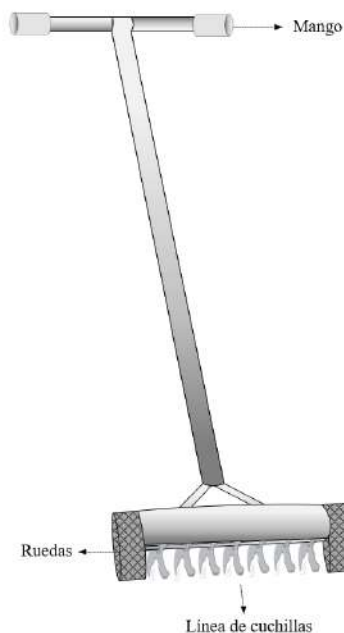
un subproducto, que de otro modo podría ser desechado, en un recurso valioso para mejorar la calidad del suelo. Esta práctica cierra el ciclo de nutrientes al reincorporar al suelo los elementos esenciales que la caña de azúcar previamente ha extraído, lo que reduce la necesidad de fertilizantes externos y minimiza los residuos. Al aprovechar la cachaza en lugar de desecharla, se contribuye a una gestión más sostenible de los recursos, optimizando su uso dentro del mismo proceso productivo. De esta manera, se promueve un modelo de producción más eficiente y respetuoso con el medio ambiente, alineado con los principios de la economía circular que buscan maximizar el valor de los recursos a lo largo de su ciclo de vida.

7.3.2.1.3 Dispositivo para Control de Arvenses. En esta subsección, se propone el diseño e implementación de un dispositivo innovador para el control de arvenses, adaptado específicamente para la eliminación de maleza en cultivos de caña. Este dispositivo busca proporcionar una alternativa eficiente a los herbicidas y reducir el esfuerzo físico asociado con el uso de herramientas tradicionales como el azadón.

El dispositivo propuesto (ver Figura 20) funciona mediante un mecanismo de corte rotativo o de cuchillas ajustables que se desplazan sobre el suelo. Equipado con un mango ergonómico y ruedas para facilitar su manejo, el dispositivo permite al usuario controlar y ajustar la altura de corte, adaptándose a diferentes tipos de arvenses y densidades de maleza. Las cuchillas giratorias o fijas cortan la maleza a nivel del suelo, minimizando el impacto en las plantas cultivadas y evitando la propagación de semillas de maleza.

Figura 20

Dispositivo de control de arvenses



El diseño de este dispositivo presenta varias ventajas significativas. En primer lugar, al eliminar la necesidad de herbicidas químicos, contribuye a la reducción de la contaminación del suelo y del agua, además de disminuir la exposición de los trabajadores a sustancias potencialmente dañinas.

El dispositivo también puede combinarse con el método de coberturas muertas aprovechando el bagazo restante u otro tipo de residuos orgánicos que se encuentren disponibles en la unidad productiva. Este método, como lo describen Bernal y Díaz (2020), mejora la estructura del suelo y, en algunos casos, suprime las arvenses mediante la liberación de toxinas. Esta combinación de métodos no solo optimiza el control de maleza, sino que también promueve una gestión más sostenible del suelo.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

En términos de impacto ambiental, la implementación del dispositivo apoyaría la sostenibilidad al reducir la dependencia de productos químicos y promover prácticas agrícolas más ecológicas. El manejo efectivo de la maleza sin recurrir a herbicidas contribuye a un ecosistema más equilibrado y menos perjudicial para la biodiversidad local. Además, la ergonomía del dispositivo disminuye el esfuerzo físico requerido, mejorando las condiciones de trabajo para los agricultores y fomentando prácticas de cultivo más sostenibles y accesibles.

7.3.2.1.4 Diseño e Implementación de un Sistema de Recolección y Reutilización de Vapor. Para mitigar el impacto negativo al ambiente debido a la liberación no regulada de vapor en la línea de fondos, se propone el diseño e implementación de un sistema de recolección y reutilización de este recurso en el proceso de producción de panela. Este sistema tiene como objetivo captar el vapor generado, canalizarlo y redirigirlo hacia un módulo de condensación, donde será enfriado y convertido de nuevo en líquido.

La recolección funcionaría mediante el siguiente proceso: el vapor captado se traslada a través de tuberías hacia el módulo de condensación, que empleará intercambiadores de calor para enfriarlo. El líquido condensado se recolecta y analiza para evaluar su calidad y posibles contaminantes, determinando su viabilidad para ser reincorporado al proceso, por ejemplo, como agua para el moldeo o en otras etapas del proceso.

Por otra parte, con el mismo objetivo también se propone la realización de un estudio de caracterización de vapor para evaluar si puede ser utilizado como fuente de energía. Esto consistiría en la instalación de un sistema de recuperación de energía térmica, que convierta la

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

energía del vapor en energía útil para el proceso, reduciendo así la dependencia de fuentes externas de energía y mejorando la eficiencia general.

La implementación de este sistema podría optimizar el uso de recursos energéticos, reducir el desperdicio y disminuir la liberación de vapor caliente al medio ambiente, ayudando a mitigar impactos negativos asociados con las emisiones de vapor. Además, al recuperar ese vapor y evitar que llegue al techo de las unidades productivas, se mejoran las condiciones de inocuidad en la línea de producción. Esto se debe a que se evitaría que las gotas, que se condensan en el techo durante la noche por las bajas temperaturas, caigan nuevamente en los fondos donde se está llevando a cabo el proceso. Finalmente, la recuperación de energía térmica también reduce la necesidad de fuentes externas de energía, beneficiando tanto económicamente como ambientalmente al proceso de producción de panela.

7.3.2.1.5 Diseño e Implementación de un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales.

Para abordar el problema de la contaminación de fuentes hídricas debido al manejo inadecuado de las aguas residuales en el proceso de producción de panela, se propone desarrollar e implementar un sistema integral de tratamiento de aguas residuales, diseñado para reducir significativamente la carga contaminante de estas antes de su disposición final, protegiendo así los cuerpos de agua y minimizando su impacto ambiental.

Para el correcto funcionamiento de este sistema, es necesario hacer un estudio de viabilidad, de manera que se pueda verificar que se cuenta con la infraestructura suficiente y que, además, el agua residual es apta para un posterior tratamiento. De ser así, este sistema complementaríala idea inicial de recircular y reciclar el agua tratada en otras actividades auxiliares

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

del proceso, fomentando, al igual que otras de las propuestas, la construcción progresiva de un modelo de economía circular.

El desarrollo e implementación de un sistema integral de tratamiento de aguas residuales no solo representa un avance significativo en la mitigación de la contaminación hídrica en el sector panelero, sino que también refuerza el compromiso con la sostenibilidad ambiental, optimizando el uso de los recursos, e impulsando un ciclo productivo más eficiente y respetuoso con el entorno.

7.3.2.1.6 Implementación del SG-SST. La propuesta de implementar un SG-SST en el sector panelero tiene como objetivo fundamental mejorar las condiciones laborales y, en consecuencia, generar un impacto positivo en los trabajadores. Este sistema, diseñado para identificar, evaluar y controlar los riesgos asociados con el entorno laboral, buscando la reducción de la incidencia de accidentes y enfermedades ocupacionales.

Esta propuesta beneficia directamente a los operarios a la vez que contribuye a una mayor productividad, pues al garantizar la seguridad y bienestar de los trabajadores, es posible que su satisfacción aumente significativamente y se motiven a realizar su trabajo de manera más eficiente.

El enfoque de este sistema se alinea con la Resolución 0312 de 2019, por lo que, entre algunos aspectos, se contempla la elaboración y ejecución de un plan de capacitación anual, la afiliación al Sistema de Seguridad Social Integral, la creación de una política de SST, el desarrollo de actividades de medicina del trabajo y de prevención y promoción de la salud, entre otros requisitos claramente especificados por el Ministerio de Trabajo.

Al adherirse a esta normativa, el sector panelero sentaría las bases para cumplir con los requisitos legales y alcanzar los estándares de seguridad y salud, promoviendo un entorno de

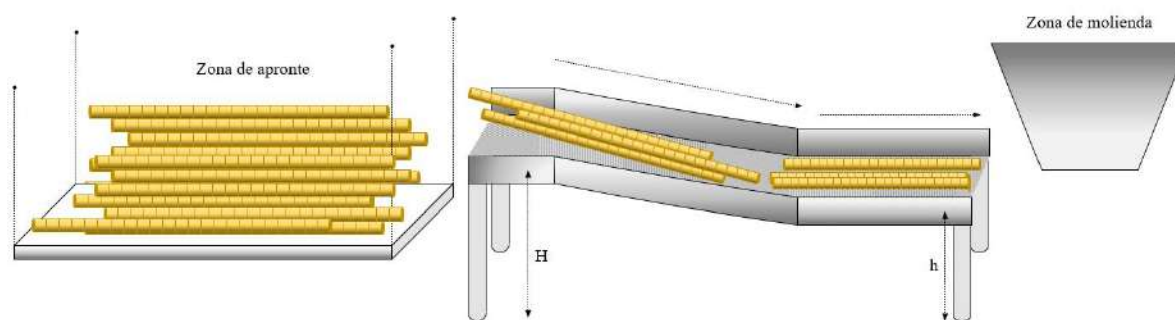
HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

trabajo seguro y saludable, lo que a largo plazo fortalecería el compromiso social y la sostenibilidad del sector.

7.3.2.1.7 Implementación de un Dispositivo de Transporte por Gravedad en la Zona de Apronte. Para optimizar el transporte de la caña desde la zona de apronte hasta la zona de molienda, se propone la implementación de dos dispositivos complementarios que buscan reducir el esfuerzo físico de los trabajadores, disminuir los tiempos de traslado y mejorar la seguridad en el lugar de trabajo. El primero es un dispositivo de transporte por gravedad en la zona de apronte y el segundo es una plataforma de elevación accionada por un sistema de cadenas (ver Figura 21).

Figura 21

Dispositivo de transporte por gravedad



El dispositivo de transporte por gravedad, diseñado con un sistema de canaleta, facilita el desplazamiento de la caña desde la zona de apronte hasta la zona de molienda. Este sistema utiliza la inclinación natural de la canaleta para mover la materia prima de un punto más alto a uno más bajo, aprovechando la diferencia de alturas para disminuir la necesidad de esfuerzo manual. Esta

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

solución no solo reduce el tiempo necesario para trasladar la caña, sino que también disminuye el riesgo de lesiones por levantamiento y transporte manual, mejorando la ergonomía del proceso.

Por otro lado, la plataforma de elevación con sistema de cadenas ofrece una solución eficiente para el transporte vertical de la materia prima. Este dispositivo permite subir y bajar cargas desde el suelo hasta el punto más alto del transportador, utilizando un mecanismo motorizado. La plataforma se desplaza a lo largo de una estructura de guía, lo que asegura un movimiento controlado de los materiales pesados, optimizando el flujo de trabajo y minimizando los riesgos asociados al manejo manual de cargas.

La implementación de estos dos dispositivos busca reducir significativamente el esfuerzo físico requerido por los trabajadores para trasladar la caña, disminuyendo así la probabilidad de lesiones por el alza de pesos excesivos de manera repetitiva. Paralelamente puede aportar a la optimización de los tiempos de transporte de la materia prima, mejorando la eficiencia general del proceso de producción y logrando un manejo más ágil y seguro de la caña.

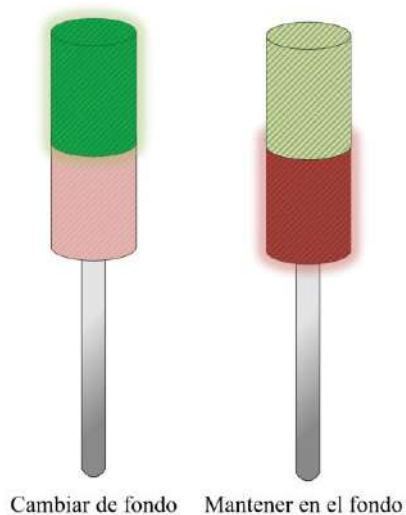
7.3.2.2 Poka-Yoke. *Poka-Yoke* es una herramienta enfocada en la prevención de errores y la eliminación de defectos en los procesos productivos. Su principio fundamental es diseñar mecanismos que impidan la ocurrencia de fallos o que los detecten de manera automática antes de que se conviertan en problemas mayores.

En el contexto de la producción de panela, la implementación de *Poka-Yoke* tiene como objetivo asegurar, sobre todo, la calidad del producto final minimizando las variaciones no deseadas.

7.3.2.2.1 Diseño e Implementación de un Dispositivo de Control Visual en la Línea de Fondos. Para mejorar el control y la precisión en la línea de fondos durante el proceso de producción de panela, se propone el diseño e implementación de un dispositivo de control visual (ver Figura 22). Este dispositivo está diseñado para indicar de manera clara cuándo se debe realizar el cambio de líquido de un fondo a otro a través de un sistema luces de colores que proporcionen señales visuales a los operarios: la luz verde indica que es el momento adecuado para proceder con el cambio de fondo, mientras que la luz roja señala que el líquido debe permanecer en el fondo actual hasta que se alcance la temperatura óptima.

Figura 22

Dispositivo Poka-Yoke



Mediante su instalación en puntos estratégicos de la línea de fondos, el dispositivo busca asegurar que las señales sean visibles desde cualquier posición de trabajo, reduciendo el riesgo de errores en el proceso y favoreciendo la estandarización en la producción de panela.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

7.3.2.3 5S's. La herramienta 5S's, es un enfoque sistemático que se presenta como una estrategia para mejorar la eficiencia del proceso de producción de panela a través de la organización. Esta metodología se basa en cinco principios clave: clasificar, ordenar, limpiar, estandarizar y sostener. Cada uno de estos principios juega un papel crucial en la creación de un entorno de trabajo más seguro, facilitando la eliminación de desperdicios y la optimización de los recursos.

7.3.2.3.1 Fortalecimiento del SG-SST Mediante la Implementación de un Sistema de 5s's. Para fortalecer el SG-SST descrito en subsecciones anteriores, se propone la implementación de un sistema de 5S's como una herramienta clave para mejorar las condiciones del entorno laboral. Este enfoque se centra en la organización y la limpieza, contribuyendo a la prevención de accidentes y a la creación de un ambiente más seguro para los trabajadores.

La aplicación de la metodología 5S's comienza con la clasificación de herramientas, materiales y equipos, eliminando aquellos que no son necesarios para posteriormente ordenar los elementos que si lo son, de manera que sean fácilmente alcanzados por los operarios.

Una vez ordenado el espacio de trabajo, el siguiente objetivo es limpiar los espacios y superficies, de modo que los trabajadores perciban una mejoría en el entorno que concurren diariamente y creen la cultura de mantener sus estaciones de trabajo en condiciones higiénicas por su propia voluntad y motivación. Cuando se logre establecer este hábito en los trabajadores, tras varias sesiones de limpieza y organización, se puede establecer un estándar, que les indique a los trabajadores los mínimos aceptables de orden y aseo.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

Por último, es importante hacer perdurar esta nueva cultura organizacional, recordando constantemente los acuerdos creados conjuntamente y los beneficios que trae consigo un entorno laboral más organizado.

Después de describir cómo se pueden aplicar las herramientas *Lean* para mejorar la sostenibilidad del sector panelero, se resume en la siguiente tabla la relación entre cada problemática, propuesta de solución y su herramienta *Lean* asociada.

Tabla 7

Herramientas Lean asociadas a las problemáticas

Causa	Problemática asociada	Propuesta	Herramienta <i>Lean</i> de aplicación específica	Herramientas <i>Lean</i> de aplicación transversal
Uso inadecuado de recursos naturales	Uso excesivo del recurso hídrico	Diseño e implementación de un sistema de recolección y recirculación de agua; Diseño e implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales	<i>Kaizen</i>	VSM, KPI's, Trabajo estándar, A3 report, Herramientas de diagnóstico, SSVSM, Sustainable manufacturing.
	Alteración de las propiedades del suelo	Control biológico y compostaje, Dispositivo para el control de arvenses	<i>Kaizen</i>	
	Uso ineficiente del recurso energético	No aplica	No aplica	
Gestión ineficiente de residuos	Liberación no regulada de vapor	Diseño e implementación de un sistema de recolección y reutilización de vapor	<i>Kaizen</i>	
	Inexistencia de infraestructura para el	Diseño e implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales	<i>Kaizen</i>	

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

	tratamiento de aguas residuales		
	Liberación no controlada de emisiones	Diseño e implementación de un sistema de recolección y reutilización de vapor	<i>Kaizen</i>
Condiciones laborales desafiantes	Trabajadores altamente expuestos a riesgos	Control biológico y compostaje, Dispositivo para el control de arvenses; Implementación del SG-SST; Implementación de un dispositivo de transporte por gravedad en la zona de apronte; Implementación de un sistema de 5S's	<i>Kaizen; 5S's</i>
	Sobreesfuerzo de los trabajadores	Dispositivo para el control de arvenses; Implementación del SG-SST; Implementación de un dispositivo de transporte por gravedad en la zona de apronte	<i>Kaizen</i>
	Falta de cobertura en seguridad social y riesgos laborales	Implementación del SG-SST	<i>Kaizen</i>
	Ausencia de programas de bienestar laboral	Implementación del SG-SST; Implementación de un sistema de 5S's	<i>Kaizen; 5S's</i>
	Inexistencia de mecanismos de control	Diseño e implementación de un dispositivo de control visual en la línea de fondos	<i>Poka-Yoke</i>
Falta de estandarización de procesos	Ausencia de información y guías de procedimientos operativos	No aplica	No aplica

A pesar de la amplia gama de herramientas *Lean* revisadas en la literatura, algunas no fueron consideradas viables en el contexto específico del sector panelero de la provincia de Guanentá. A continuación, se exponen las principales razones, basadas en las características particulares del sector y sus limitaciones.

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

En primer lugar, la tecnología blockchain, discutida en la revisión de la literatura como una herramienta relevante para la trazabilidad y la transparencia en cadenas de suministro, no fue propuesta en este estudio. Esto se debe a la falta de modernización en el sector panelero, donde la infraestructura tecnológica es prácticamente inexistente. La implementación de blockchain requiere un entorno digital avanzado, el cual no está disponible ni accesible en las unidades productivas de la región analizada.

Por esta misma razón, el monitoreo en tiempo real, una de las prácticas claves en industrias que buscan mejorar la eficiencia a través de tecnologías 4.0, tampoco se propuso. La carencia de sistemas de medición y monitoreo digital en el sector panelero limita la posibilidad de implementar herramientas que dependen de la recopilación y análisis constante de datos en tiempo real.

Finalmente, los modelos de toma de decisiones para la selección de herramientas Lean no fueron sugeridos debido a la necesidad de un análisis más profundo y específico de los procesos productivos. Estos modelos requieren mediciones y datos cuantitativos detallados para identificar con exactitud las áreas de mejora, sin embargo, la falta de infraestructura y capacidad para realizar estas mediciones en el sector panelero, junto con la ausencia de formación técnica y conocimientos especializados en teoría de decisión por parte de los productores, imposibilita su implementación.

Un factor clave que afecta todas estas limitaciones es la falta de presupuesto. El sector panelero, particularmente en la provincia de Guanentá, enfrenta una significativa escasez de inversión, lo que restringe el acceso a tecnologías avanzadas y recursos técnicos. Las unidades productivas operan con márgenes económicos reducidos, por lo que los productores no cuentan con los fondos suficientes para cubrir estos costos y la adopción de estas herramientas se vuelve

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

inviabile en el corto plazo. Esta situación perpetúa la dependencia de métodos tradicionales y limita la posibilidad de aplicar innovaciones que podrían mejorar la productividad y sostenibilidad a largo plazo.

7.4 Diseño de una guía de implementación de herramientas *Lean* en el sector panelero

En el apéndice B, se presenta una propuesta de guía práctica para la implementación de herramientas Lean en el sector panelero. Esta guía fue diseñada con el propósito de facilitar la implementación de estas herramientas en las unidades productivas del sector y fue concebida como un recurso práctico y accesible para los productores que, en su mayoría, no poseen conocimientos especializados en técnicas de mejora continua. Su objetivo es ofrecer un apoyo claro y sencillo, que permita aplicar metodologías Lean en un entorno rural y mejorar tanto la productividad como la sostenibilidad de los procesos productivos.

Durante su desarrollo, se tomaron en consideración varios factores relevantes. En primer lugar, la estructura de la guía fue diseñada de manera secuencial, presentando cada herramienta Lean desde sus fundamentos básicos hasta su aplicación práctica en el contexto específico de la producción de panela. Esto incluye descripciones detalladas de cómo cada herramienta puede ser adaptada a la realidad del sector, acompañadas de ejemplos en formato de videos cortos que muestran su utilidad en la solución de problemas comunes en las unidades productivas. Además, se empleó un lenguaje accesible y ejemplos visuales, permitiendo a los productores comprender el contenido sin necesidad de tener conocimientos técnicos previos.

Una consideración clave en la elaboración de la guía fue su adaptación al entorno productivo de los productores paneleros, caracterizado por limitaciones tecnológicas y

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

económicas. Se buscó garantizar que las herramientas propuestas fueran viables en este contexto, y que los ejemplos ofrecieran soluciones prácticas a problemas específicos que enfrentan en su día a día. De esta forma, la guía no solo introduce conceptos teóricos, sino que los traduce en aplicaciones tangibles y alcanzables.

Finalmente, la validación de la guía se realizó a través de un proceso de retroalimentación con los dueños de las unidades productivas involucradas en el estudio (apéndice D), quienes mostraron interés en los resultados del estudio y manifestaron un compromiso de implementarlos progresivamente en sus procesos.

8. Conclusiones

El sector panelero de la provincia de Guanentá enfrenta una serie de desafíos derivados de la adherencia a prácticas de producción tradicionales en un entorno competitivo que exige mayores niveles de productividad y sostenibilidad. Este estudio ha identificado las problemáticas clave del sector y ha establecido cómo las herramientas *Lean* pueden ser aplicadas para mejorar estos aspectos. La implementación de estas herramientas no solo tiene el potencial para elevar la eficiencia operativa y promover prácticas sostenibles, sino que también puede impulsar una transformación cultural necesaria para superar la resistencia al cambio que caracteriza a los productores incluidos en este estudio.

La revisión de la literatura ha permitido identificar varias herramientas *Lean* con enfoque sostenible, cuyas aplicaciones han sido efectivas en la reducción de desperdicios y la mejora de la productividad. Herramientas, como el *Sustainable value stream mapping* (SVSM), 5S, trabajo estándar, entre otras, han demostrado ser eficaces en contextos agrícolas un poco más desarrollados y con mayores posibilidades de inversión, proporcionando un referente valioso para una adaptación futura en el sector panelero de la provincia de Guanentá.

La descripción del proceso de producción de panela ha destacado las etapas clave y las tecnologías utilizadas a nivel nacional en esta actividad económica. Se identificaron herramientas avanzadas, como la mecanización de la cosecha y el transporte de caña mediante cable de gravedad o autopropulsado, que, aunque representan avances significativos en el desarrollo del sector, todavía no están disponibles para los productores incluidos en este estudio. Lo anterior recalca el rezago tecnológico del sector panelero de Guanentá, debido principalmente a sus limitaciones

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

presupuestales, lo que dificulta su adaptación y permanencia en un mercado cada vez más exigente en términos de reducción de costos y calidad del producto.

De manera similar, la caracterización del sector en Guanentá ha revelado que, aunque existen diversas problemáticas en los tres pilares de la sostenibilidad, relacionadas con la adherencia a prácticas tradicionales y las limitaciones presupuestales, también existen oportunidades significativas para implementar herramientas *Lean*, cuya aplicación tiene el potencial para minimizar los desperdicios y mejorar las condiciones del sector. Los desafíos encontrados incluyen la gestión ineficiente de recursos y residuos, condiciones laborales difíciles y la falta de estandarización en los procesos. Esta caracterización enfatiza la necesidad de soluciones adaptadas al contexto local que puedan abordar tanto los aspectos técnicos como los culturales del sector.

Posterior a los resultados obtenidos de la caracterización, se han desarrollado recomendaciones específicas para los productores de panela basadas en la aplicabilidad de herramientas *Lean* como 5S's, *Value Stream Mapping*, Poka-Yoke, Kaizen, entre otras. Estas recomendaciones están orientadas a mejorar la productividad y fomentar prácticas sostenibles, abordando tanto las barreras tecnológicas como las culturales. Es importante reconocer que se ha logrado sembrar en los productores la semilla de la curiosidad por implementar estas herramientas, ya que, en la reunión de socialización, fue notorio el interés por conocer y desarrollar las metodologías presentadas en la guía de implementación de herramientas *Lean*.

Recomendaciones

Este estudio proporciona una base sólida para la implementación de herramientas *Lean* en el sector panelero de la provincia de Guantán, Santander. No obstante, es importante considerar algunas limitaciones que afectaron el desarrollo de la investigación y que deben ser tomadas en cuenta al interpretar los resultados y formular recomendaciones.

En primer lugar, el desarrollo del estudio se vio limitado debido a que fue una iniciativa de investigación generada desde la universidad hacia las unidades productivas, y no al contrario. Esto redujo el alcance cuantitativo de la investigación, ya que dificultó la toma de mediciones específicas. Esta limitación se debió principalmente a dos factores: la falta de tecnología tanto por parte de los autores como de los productores para realizar dichas mediciones, y el hecho de que el alcance del proyecto no contemplaba la recolección de datos cuantitativos específicos.

Reforzando lo anterior, la recopilación de datos se basó en entrevistas y observaciones directas, lo que puede haber introducido un sesgo de percepción en el análisis de los procesos productivos. Se recomienda complementar estos métodos con mediciones más objetivas y cuantitativas, como indicadores precisos de rendimiento, consumo energético y generación de residuos, para obtener información más precisa de los procesos a estudiar.

Referencias Bibliográficas

- Abreu, M. F., Alves, A. C., & Moreira, F. (2017). Lean-Green models for eco-efficient and sustainable production. *Energy*, 137, 846–853. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.04.016>
- Anzules, Í. del C. P., & Castro, D. W. M. (2022). Contaminación ambiental. *RECIMUNDO*, 6(2), 93–103. [https://doi.org/10.26820/RECIMUNDO/6.\(2\).ABR.2022.93-103](https://doi.org/10.26820/RECIMUNDO/6.(2).ABR.2022.93-103)
- Azevedo, S. G., Carvalho, H., Duarte, S., & Cruz-Machado, V. (2012). Influence of green and lean upstream supply chain management practices on business sustainability. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 59(4), 753–765. <https://doi.org/10.1109/TEM.2012.2189108>
- Badii, M., & Abreu, J. (2006). Biological control a sustainable way of pest control. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 1, 82–89.
- Bancovich Erquínigo, A., OrtizPorrás, J., Quintana Saavedra, H., Crispin Chamorro, P., Manrique Alva, R., & Vilca Carhuapuma, P. (2023). Green lean method to identify ecological waste in a nectar factory. *International Journal of Production Management and Engineering*, 11(2), 197–207. <https://doi.org/10.4995/ijpme.2023.19598>
- Bansal, P., & Roth, K. (2000). Why companies go green: A model of ecological responsiveness. *Academy of Management Journal*, 43(4), 717–736. <https://doi.org/10.2307/1556363>

- Barth, H., & Melin, M. (2018). A Green Lean approach to global competition and climate change in the agricultural sector – A Swedish case study. *Journal of Cleaner Production*, 204, 183–192. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.09.021>
- Batwara, A., Sharma, V., Makkar, M., & Giallanza, A. (2024a). Impact of smart sustainable value stream mapping – Fuzzy PSI decision-making framework. *Sustainable Futures*, 7, 100201. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100201>
- Benabdellah, A. C., Zekhnini, K., Cherrafi, A., & Reyes, J. G. (2024). Driving Sustainable Innovation: Exploring Lean, Green, Circular, and Smart Design. *Procedia Computer Science*, 232, 880–889. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2024.01.088>
- Cadavid Osorio, G. (2007). *Buenas practicas agrícolas y buenas prácticas de manufactura en la producción de caña y panela - Manual técnico*. 202. <http://www.fao.org/3/a-a1525s.pdf>
- Campaña, P. J. G., & Cabrera, D. C. Z. (2022). Impactos ambientales en la producción de panela en la parroquia de Pacto del Distrito Metropolitano de Quito. *Esferas*, 3, 94–111. <https://doi.org/10.18272/ESFERAS.V3I1.2430>
- Ciano, M. P., Dallasega, P., Orzes, G., & Rossi, T. (2021). One-to-one relationships between Industry 4.0 technologies and Lean Production techniques: a multiple case study. *International Journal of Production Research*, 59(5), 1386–1410. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1821119>
- de Souza, J. F. F., Fernandes, B. D., Rotta, I., Visacri, M. B., & de Mendonça Lima, T. (2024). Key performance indicators for pharmaceutical services: A systematic review. *Exploratory*

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

- Research in Clinical and Social Pharmacy*, 14, 100441.
<https://doi.org/10.1016/J.RCSOP.2024.100441>
- Deantonio-Florido, L. Y., Ospina-Parra, C. E., Varón Ramírez, V. M., & López-González, X. (2020). Tecnologías para el sector panelero. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria* (agrosavia).
- De-La-Flor, A., Vigil, M., & Ruiz-Ruiz, M. F. (2024). Improvement of the sustainable performance in a textile company using the lean-green methodology. *International Journal of Production Management and Engineering*, 12(1), 105–116.
<https://doi.org/10.4995/IJPME.2024.20260>
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2023). *Plan Nacional de Desarrollo (2022-2026)*.
- Deshmukh, M., Gangele, A., Gope, D. K., & Dewangan, S. (2022). Study and implementation of lean manufacturing strategies: A literature review. *Materials Today: Proceedings*, 62, 1489–1495. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.02.155>
- Díaz Diez, C. A., Bernal Estrada, J. A., Builes Gaitán, S., Caicedo, A. M., Carabalí Muñoz, A., Casamitjana Causa, M., Córdoba Gaona, Ó. de J., Duque Ríos, M., Forero Longas, F., Londoño Bonilla, M., Londoño Zuluaga, M. E., García Lozano, J., Kondo, T., Osorio Vega, N. W., Rodríguez Yzquierdo, G. A., Rodríguez-León, A. K., Rondón Salas, T. M., Ruiz, D., Sandoval Aldana, A., ... Vega Marín, C. A. (2020). Actualización tecnológica y buenas prácticas agrícolas (BPA) en el cultivo de aguacate. Editorial AGROSAVIA.
<https://doi.org/10.21930/AGROSAVIA.MANUAL.7403831>

- dos Santos, D. M. C., dos Santos, B. K., & dos Santos, C. G. (2021). Implementation of a standard work routine using Lean Manufacturing tools: A case Study. *Gestão & Produção*, 28(1), e4823. <https://doi.org/10.1590/0104-530X4823-20>
- Dües, C. M., Tan, K. H., & Lim, M. (2013). Green as the new Lean: How to use Lean practices as a catalyst to greening your supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 40, 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.12.023>
- Elias Castells, X. (2012). *Clasificación y gestión de residuos*. 50. https://books.google.com/books/about/Clasificaci%C3%B3n_y_gesti%C3%B3n_de_residuos.html?hl=es&id=enIftUKzxx8C
- Fiorello, M., Gladysz, B., Corti, D., Wybraniak-Kujawa, M., Ejsmont, K., & Sorlini, M. (2023). Towards a smart lean green production paradigm to improve operational performance. *Journal of Cleaner Production*, 413, 137418. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.137418>
- Galvis, D. (2010). Sistemas de corte mecanizado de la caña de azúcar. Equipos de cosecha. Tecnicana.
- Gao, T., Jin, P., Song, D., & Chen, B. (2022). Tracking the carbon footprint of China's coal-fired power system. *Resources, Conservation and Recycling*, 177, 105964. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105964>
- Guleria, P., Pathania, A., Bhatti, H., Rojhe, K., & Mahto, D. (2021). Leveraging Lean Six Sigma: Reducing defects and rejections in filter manufacturing industry. *Materials Today: Proceedings*, 46, 8532–8539. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.03.535>

- Haapala, K. R., Zhao, F., Camelio, J., Sutherland, J. W., Skerlos, S. J., Dornfeld, D. A., Jawahir, I. S., Clarens, A. F., & Rickli, J. L. (2013). A review of engineering research in sustainable manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135(4). <https://doi.org/10.1115/1.4024040/694649>
- Hegedić, M., Gudlin, M., Golec, M., & Tošanović, N. (2024). Lean and Green Decision Model for Lean Tools Selection. *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 1173, 16(3), 1173. <https://doi.org/10.3390/SU16031173>
- Imai, M. (1986). *Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success*. McGraw-Hill Education.
- Instituto Colombiano Agropecuario - ICA. (n.d.). Retrieved October 15, 2024, from <https://www.ica.gov.co/noticias/ica-firma-acuerdo-sector-panelero>.
- Jamwal, A., Towhidul Islam Nayim, S. M., Shukla, R. K., Agrawal, R., & Gupta, S. (2021). Assessment of barriers in lead time improvement: An exploratory study of electronics manufacturing companies in Himachal Pradesh (India). *International Journal of Business and Systems Research*, 15(2), 182–199. <https://doi.org/10.1504/IJBSR.2021.113422>
- Jiménez Aguilar, S. A., & Panchi Taco, D. J. (2023). Determinación de contaminantes físicos en el proceso de elaboración de panela granulada, en la parroquia de Palo Quemado del cantón Sigchos. *Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi, (UTC)*. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/11014>
- Johansson, P. E., & Osterman, C. (2017). Conceptions and operational use of value and waste in lean manufacturing—an interpretivist approach. *International Journal of Production Research*, 55(23), 6903–6915. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1326642>

- Kanan, M., Dilshad, A. R., Zahoor, S., Hussain, A., Habib, M. S., Mehmood, A., Abusaq, Z., Hamdan, A., & Asad, J. (2023). An Empirical Study of the Implementation of an Integrated Ergo-Green-Lean Framework: A Case Study. *Sustainability (Switzerland)*, 15(13), 10138. <https://doi.org/10.3390/su151310138>
- Karuppiah, K., Sankaranarayanan, B., & Lo, H. W. (2024). A systematic literature review on the evolution of sustainable manufacturing practices: Key findings and implications. *Cleaner Engineering and Technology*, 22, 100798. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100798>
- Kofi Opoku, R., Yeboah Nyamah, E., Yeboah Nyamah, E., Agyapong, G., & Efua Frimpong, S. (2023). Sustainable manufacturing practices and sustainable performance: Evidence from Ghana's food manufacturing sector. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 9, 100120. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2023.100120>
- Legis Comex. (2022). *Exportación de panela Colombiana*. <https://blog.legis.com.co/comercio-exterior/exportacion-de-panela-colombiana>
- Leong, W. D., Lam, H. L., Ng, W. P. Q., Lim, C. H., Tan, C. P., & Ponnambalam, S. G. (2019). Lean and Green Manufacturing—a Review on its Applications and Impacts. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 3(1), 5–23. <https://doi.org/10.1007/S41660-019-00082-X/FIGURES/5>
- Liu, T., Bi, J., Xing, X., Zhu, Y., Wang, J., & Yu, S. (2021). Bridging production factors allocation and sustainable operations in China's heavy-polluting firms: The moderation effect of internationalization. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126637. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126637>

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

- Manzanas-Cañizares, C., Sánchez-Lite, A., Rosales-Prieto, V. F., Fuentes-Bargues, J. L., & González-Gaya, C. (2022). A 5S Lean Strategy for a Sustainable Welding Process. *Sustainability (Switzerland)*, 14(11), 6499. <https://doi.org/10.3390/su14116499>
- Mariappan, R. C. S., Veerabathiran, A., K.P, P., & K.E.K, V. (2023). Intelligent VSM Model: a way to adopt Industry 4.0 technologies in manufacturing industry. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129(5), 2195–2214. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12406-w>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2018). *Cadena Agroindustrial de la Panela*.
- Muotka, S., Togiani, A., & Varis, J. (2023). A Design Thinking Approach: Applying 5S Methodology Effectively in an Industrial Work Environment. *Procedia CIRP*, 119, 363–370. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2023.03.103>
- Musa, A. I., & Alwan, Q. N. (2024). The Impact of Lean Manufacturing Practices in Enhancing Sustainable Performance through Lean Culture: Field Study at the General Company for Food Products – Baghdad. *International Journal of Religion*, 5(8), 1000–1012. <https://doi.org/10.61707/21prkp61>
- Naeemah, A. J., & Wong, K. Y. (2023). Sustainability metrics and a hybrid decision-making model for selecting lean manufacturing tools. *Resources, Environment and Sustainability*, 13, 100120. <https://doi.org/10.1016/J.RESENV.2023.100120>
- Nayal, K., Raut, R. D., Narkhede, B. E., Priyadarshinee, P., Panchal, G. B., & Gedam, V. v. (2023). Antecedents for blockchain technology-enabled sustainable agriculture supply chain.

- Annals of Operations Research*, 327(1), 293–337. <https://doi.org/10.1007/S10479-021-04423-3/TABLES/6>
- Ordoñez-Díaz, M. M., Rueda-Quiñónez, L. V., Ordoñez-Díaz, M. M., & Rueda-Quiñónez, L. V. (2017). Evaluación de los impactos socioambientales asociados a la producción de panela en Santander (Colombia). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(2), 379–396. https://doi.org/10.21930/RCTA.VOL18_NUM2_ART:637
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Objetivos y Metas de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Palaniappan, SP., & Annadurai, K. (1999). Organic farming: theory and practice. 257. <http://www.scientificpub.com/book-details/Organic-Farming-Theory-and-Practice-106.html>
- Pinos-Rodríguez, J. M., Peña-Avelino, L. Y., Rendón-Huerta, J. A., González-González, C., Tristán-Patiño, F., & García-López, J. C. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000400004
- Ponce Andrade, A. (2018). El Estudio de Caso Múltiple. Una estrategia de Investigación en el ámbito de la Administración. *Revista Publicando*, 5(15(2)), 21–34. <https://revistapublicando.org/revista/index.php/crv/article/view/1359>
- Quezada Moreno, W. F. (2007). Guía técnica de agroindustria panelera.

- Quiroz Guerrero, I., & Pérez Vázquez, A. (2013). Vinaza y compost de cachaza: efecto en la calidad del suelo cultivado con caña de azúcar. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(SPE5), 1069–1075.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342013000900019&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Rahardjo, B., Wang, F. K., Yeh, R. H., & Chen, Y. P. (2023). Lean Manufacturing in Industry 4.0: A Smart and Sustainable Manufacturing System. *Machines*, 11(1), 72.
<https://doi.org/10.3390/machines11010072>
- Render, B., & Heizer, J. (1996). *Administración de operaciones*. Ed. Prentice Hall.
- Revista Semana. (2020). *¿Cuáles son los emprendimientos con panela en Colombia?*
<https://www.semana.com/emprendimiento/articulo/cuales-son-los-emprendimientos-con-panela-en-colombia/281885/>
- Rodríguez Borray, G. (2004). La agroindustria rural de la panela en Colombia: Roles, problemática y nuevos retos. *Innovación y Cambio Tecnológico*, 4(1), 5–11.
- Rojas, K. K. P., Quiroz-Flores, J. C., & Nallusamy, S. (2023). Minimization of Product Distribution Delays through An Integration Model of Lean Manufacturing Tools and A3 Report - Case Study. *International Journal of Mechanical Engineering*, Volume 10(9), 31–43. <https://doi.org/10.14445/23488360/IJME-V10I9P103>
- Roldán-Molina, G. R., Ruano-Ordás, D., Basto-Fernandes, V., & Méndez, J. R. (2021). An ontology knowledge inspection methodology for quality assessment and continuous

HERRAMIENTAS LEAN PARA EL SECTOR PANELERO

- improvement. *Data & Knowledge Engineering*, 133, 101889.
<https://doi.org/10.1016/J.DATAK.2021.101889>
- Saraswati, D., Sari, E., & Sekarwardhani, G. (2024). DEVELOPMENT OF A SUSTAINABLE LEAN COMPETITIVE STRATEGY IN A WATER PUMP COMPANY. *South African Journal of Industrial Engineering*, 35(1), 152–167. <https://doi.org/10.7166/35-1-2910>
- Sharma, A., Gupta, G., Sharma, D., Diwan, H., Pasricha, S., Kamboj, M., & Mehta, A. (2023). Application of lean methodology to frozen section workflow – An audit of present practices at a single large oncology center. *Annals of Diagnostic Pathology*, 65, 152148.
<https://doi.org/10.1016/J.ANNDIAGPATH.2023.152148>
- Sharma, S. (2009). The mediating effect of information availability between organization design variables and environmental practices in the Canadian Hotel Industry. *Business Strategy and the Environment*, 18(4), 266–276. <https://doi.org/10.1002/bse.603>
- Shrouf, F., & Miragliotta, G. (2015). Energy management based on Internet of Things: Practices and framework for adoption in production management. *Journal of Cleaner Production*, 100, 235–246. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.055>
- Sihag, A., Kumar, V., & Khod, U. (2014). Application of Value Stream Mapping in small scale industries. *International Journal of Mechanical Engineering Ad Robotic Research*, 3. www.ijmerr.com
- Singh, J., Singh, H., & Kumar, A. (2020). Impact of lean practices on organizational sustainability through green supply chain management – an empirical investigation. *International*

- Journal of Lean Six Sigma*, 11(6), 1049–1082. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-06-2017-0068>
- Sistema de Información Panelero. (2021). *Generación de Empleo*. <https://www.sipa.org.co/wp/index.php/generacion-de-empleo/>
- Sistema de Información Panelero. (2022). *Mapas por Departamento: Santander*. <https://www.sipa.org.co/wp/index.php/2023/05/16/mapas-por-departamento-santander-2022/>
- Spackman, E., Clement, F., Allan, G. M., Bell, C. M., Bjerre, L. M., Blackburn, D. F., Blais, R., Hazlewood, G., Klarenbach, S., Nicolle, L. E., Persaud, N., Alessi-Severini, S., Tierney, M., Wijeyesundera, H. C., & Manns, B. (2019). Developing key performance indicators for prescription medication systems. *PLoS ONE*, 14(1), e0210794. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210794>
- Tabash, M. I., Farooq, U., el Refae, G. A., & Belarbi, A. (2023). Tackling the ecological footprints of foreign direct investment and energy dependency through governance: empirical evidence from GCC region. *Quality and Quantity*, 57(5), 4435–4454. <https://doi.org/10.1007/s11135-022-01534-2>
- The U.S. Department of Commerce (DOC). (2011). Sustainable Manufacturing. <https://legacy.trade.gov/green/sm-101-module.asp>
- Varela-Ruiz, M., Díaz-Bravo, L., & García-Durán, R. (2012). Descripción y usos del método Delphi en investigaciones del área de la salud. *Investigación En Educación Médica*, 1(2),

90–95. <https://www.elsevier.es/es-revista-investigacion-educacion-medica-343-articulo-descripcion-usos-del-metodo-delphi-X2007505712427047>

Wilson, L. (2010). *How to implement lean manufacturing* (1st ed.). McGraw-Hill Education.

Womack, J. P., & Jones, D. T. (1996). From lean production to the lean enterprise. *IEEE Engineering Management Review*, 24, 38–46.

Yarbrough, A. C., Harris, G. A., Purdy, G. T., & Loyd, N. (2022). Developing Taiichi Ohno's Mental Model for Waste Identification in Nontraditional Applications. *ASME Open Journal of Engineering*, 1. <https://doi.org/10.1115/1.4054037>

Yusup, M. Z., Mahmood, W. H. W., Salleh, M. R., & Yusof, A. S. M. (2015). Review the influence of Lean tools and its performance against the index of manufacturing sustainability. *International Journal of Agile Systems and Management*, 8(2), 116–131. <https://doi.org/10.1504/IJASM.2015.070605>