

TITULO: Medición y simulación del impacto de lean manufacturing en la sustentabilidad social, ambiental y económica en la industria maquiladora

RESUMEN. La manufactura esbelta (LM) es un conjunto de herramientas enfocadas a disminuir los desperdicios en los procesos productivos industriales y como consecuencia, se asocia con beneficios de ahorros económicos, disminución del impacto ambiental e integración de los operadores en el proceso de toma de decisiones. Esos beneficios son transformados en índices de sustentabilidad económica, ambiental y social; sin embargo, la relación entre esas herramientas de LM y la sustentabilidad es poco conocida. Este proyecto busca las relaciones entre las herramientas de LM y los tres tipos de sustentabilidad y se fundamenta en datos recopilados de 411 gerentes laborando en la industria maquiladora de Ciudad Juárez (Chihuahua, México) mediante una encuesta estructurada que evalúa 25 herramientas de manufactura esbelta y su influencia percibida en las dimensiones social, ambiental y económica de la sustentabilidad, la cual fue realizada del 10 de enero al 10 de abril de 2025. Se ha elegido Ciudad Juárez debido a que su industria maquiladora representa la principal actividad económica, existiendo 309 empresas de ese tipo y dan empleo a 359,042 empleados de manera directa. La metodología se desarrolla en dos fases complementarias: primero, una fase de medición donde se aplicará modelado de ecuaciones estructurales (SEM) para identificar y cuantificar las relaciones causales entre las herramientas de manufactura esbelta y la sustentabilidad; analizando efectos directos, indirectos y totales, lo que permite a los gerentes conocer cuáles son las herramientas que favorecen algún tipo de sustentabilidad. Sin embargo, implementar LM requiere recursos y los gerentes desean saber cuándo obtendrán niveles adecuados de sustentabilidad de esas inversiones, por lo que, en la segunda fase de simulación, mediante dinámica de sistemas (SD), se proyectará temporalmente la evolución de estos indicadores tras la implementación de distintas combinaciones de herramientas de LM. Este estudio es relevante para la industria maquiladora, que enfrenta el triple desafío de mantener competitividad económica mientras mejora su desempeño ambiental y responsabilidad social. Como resultado de esta investigación se generarán dos artículos (JCR) analizando diferentes herramientas de LM y relacionándolas con la sustentabilidad, el primero se enfocará en herramientas de calidad y el segundo en aquellas enfocadas en las máquinas usadas en las líneas de producción. Los resultados de este proyecto permitirán a los gestores industriales priorizar inversiones en iniciativas lean según sus objetivos específicos de sustentabilidad que deseen lograr, comprender los plazos realistas para obtener resultados en cada dimensión, y diseñar estrategias integradas de mejora continua que impulsen la eficiencia operacional, la responsabilidad social y ambiental en este sector clave para la economía mexicana.

PALABRAS CLAVES: Lean manufacturing, sustentabilidad, modelado y simulación

OBJETIVOS Y METAS.

Meta 1. Generar conocimiento científico original sobre las relaciones causales entre herramientas de manufactura esbelta y las tres dimensiones de sustentabilidad en la industria maquiladora en Ciudad Juárez, contribuyendo a la teoría de la sustentabilidad industrial mediante un enfoque empírico-analítico que subsane el vacío epistemológico en este campo de estudio.

Objetivo 1. Realizar un análisis factorial de los datos recopilados de gerentes para identificar dependencias entre las herramientas de LM asociadas a calidad y maquinaria y los tres tipos de sustentabilidad ($p < 0.05$).

Objetivo 2. Desarrollar SEMs que permitan cuantificar las relaciones entre esas herramientas de LM y la sustentabilidad, lo que permitirá clasificar y jerarquizarlas según su impacto.

Meta 2. Desarrollar un marco metodológico integrado y replicable que combine el SEM y la SD para el análisis de intervenciones organizacionales complejas y sus impactos temporales en sistemas industriales, aportando una innovación metodológica en la ciencia de la sustentabilidad.

Objetivo 3. Diseñar y documentar un protocolo metodológico secuencial que integre de manera rigurosa y replicable las técnicas de SEM y SD, estableciendo los parámetros de transferencia entre los coeficientes causales del SEM y las variables y funciones del modelo de simulación en SD, validando cada fase con criterios estadísticos y de ajuste del modelo.

Objetivo 3. Validar experimentalmente el marco metodológico propuesto mediante técnicas de validación cruzada, análisis de sensibilidad y verificación de consistencia interna, contrastando las predicciones del modelo con datos históricos de implementación de manufactura esbelta cuando estén disponibles o sean facilitados por las empresas.

Meta 3. Establecer una base científica validada empíricamente que fundamente decisiones estratégicas sobre sustentabilidad en la industria manufacturera establecida en Ciudad Juárez, contribuyendo al desarrollo de un cuerpo de conocimiento autóctono sobre prácticas de manufactura sustentable adaptadas a las realidades socioeconómicas y ambientales regionales.

Objetivo 5. Desarrollar un sistema de métricas científicamente validados que permitan evaluar cuantitativamente el impacto de las herramientas de manufactura esbelta asociadas a calidad y maquinaria en los tres pilares de sustentabilidad.

Objetivo 6. Sistematizar y difundir el conocimiento generado mediante la publicación de los dos artículos JCR comprometidos, complementados con la creación de un repositorio digital de acceso abierto que contenga los datos, instrumentos de medición y análisis estadístico, facilitando la reproducibilidad científica y la transferencia de conocimiento.

AVANCES Y/O ANTECEDENTES.

La integración de LM y la sustentabilidad ha ganado atención en la investigación académica del proponente de este proyecto, especialmente en la industria maquiladora y en estudios previos he analizado esa relación con mis estudiantes de posgrado. Por ejemplo, con relación a LM y la sustentabilidad social (SOS), se han analizado herramientas de LM para la gestión de recursos humanos, encontrando que impactan positivamente en la SOS en la industria maquiladora (Figuerola et al., 2024). Las herramientas que contribuyen a mejorar la SOS son los métodos de resolución de problemas A3, la descentralización y los grupos de trabajo multifuncionales, resaltando las condiciones laborales, la seguridad y el bienestar de los empleados. Además, se ha desarrollado un enfoque que integra el SEM con SD para medir el impacto de herramientas de gestión lean en la SOS y se encontró que la mejora continua, el mantenimiento productivo total (TPM), el justo a tiempo (JIT) y la gestión de la calidad total (TQM), facilitan la SOS (J. R. Díaz-Reza et al., 2024). Se encontró que para lograr una SOS integral requiere aproximadamente 10,25 años, aunque las herramientas de LM podrían completarse en siete años. En otro estudio, se demostró que el compromiso de la dirección tiene efectos positivos directos sobre los operadores, proveedores y herramientas de fabricación lean, mejorando la calidad y sostenibilidad económica (García-Alcaraz et al., 2022), donde la dimensión humana fue resaltada como clave en las prácticas de LM.

En mis trabajos de investigación, otra área importante es el impacto medioambiental de las prácticas de LM. García Alcaraz, Morales García, et al. (2022) realizaron un estudio sobre las herramientas de LM en maquiladoras mexicanas y sus efectos en la sostenibilidad ambiental (ENS) donde se encontró que TPM, jidoka y la eficacia general de los equipos (OEE) impactan directamente en la ENS al reducir residuos, minimizar consumo de recursos y disminuir emisiones. De la misma manera, García Alcaraz, Díaz Reza, et al. (2022) exploraron la relación entre las prácticas de gestión de la cadena de suministro ecológica y el desempeño medioambiental en empresas manufactureras mexicanas. Los sistemas de gestión medioambiental, el diseño ecológico, la reducción en la fuente y la gestión medioambiental externa influyen positivamente en la ENS. En conclusión, los fabricantes que integran el pensamiento medioambiental en las operaciones de su cadena de suministro y sistema productivo logran mejoras en el desempeño ambiental.

Aunque ENS y SOS son importantes, las empresas miden primero su sustentabilidad económica (ESU). En estudios previos se ha analizado el apoyo de las herramientas de LM en los procesos de producción y su impacto en la ESU. Se ha encontrado que las herramientas centradas en el flujo de materiales, la gestión visual y la prevención de errores contribuyen significativamente a la reducción de costes, la mejora de la eficiencia y el rendimiento económico general (Díaz-Reza et al., 2022). Además, Reza et al. (2025) investigaron cómo la implementación de LM ayuda a las organizaciones a alcanzar sus objetivos estratégicos e indican que Kaizen sirve como base

para implementar otras herramientas como la gestión de calidad total, Kanban y Poka-Yoke, alineando las operaciones diarias con los objetivos estratégicos a través de Hoshin Kanri.

A pesar de esos estudios para comprender la relación entre las herramientas de LM y las dimensiones de la sostenibilidad, la investigación actual presenta varias limitaciones. La mayoría de los estudios existentes, incluidos muchos de los míos, han empleado principalmente modelos de ecuaciones estructurales (SEM) para establecer relaciones causales entre las variables. Si bien el SEM identifica eficazmente las relaciones y los efectos directos e indirectos entre las LM y la sustentabilidad, solo ofrece una instantánea estática de estas relaciones en un momento específico y los sistemas de fabricación en las maquiladoras son entornos dinámicos, son intrínsecamente complejos y evolucionan con el tiempo. La naturaleza estática de los modelos estadísticos tradicionales no permite captar los aspectos temporales de la implementación lean y el logro de la sostenibilidad. El modelado de la dinámica de sistemas ofrece ventajas significativas para abordar estas limitaciones al incorporar bucles de retroalimentación, stocks, flujos y retrasos.

Esas deficiencias de modelos anteriores basados en SEM y muestras pequeñas han hecho que en algunos de los estudios recientes ya incluyamos SD. Actualmente, para este proyecto ya se ha elaborado y aplicado un cuestionario validado en la industria maquiladora de Ciudad Juárez, mismo que evalúa los niveles de implementación de 25 herramientas de LM y su influencia percibida en las dimensiones de sostenibilidad (SOS, ENS y ESU). Se han recopilado 411 respuestas de directivos que trabajan en la industria maquiladora entre Marzo y Mayo de 2025, lo que proporciona una base sólida para un análisis más profundo. El cuestionario ha sido sometido a procesos de validación, que incluyen el juicio de expertos, pruebas piloto y la validación estadística mediante análisis factorial confirmatorio, alfa de Cronbach y validez convergente. Esto garantiza que el instrumento capta de forma fiable tanto los niveles de implementación de diversas herramientas de LM como su impacto percibido en dimensiones de la sostenibilidad. La disponibilidad de este instrumento validado y del conjunto de datos supone una ventaja significativa para la investigación propuesta, ya que permite centrarse inmediatamente en metodologías de análisis avanzadas en lugar de en la recopilación preliminar de datos.

JUSTIFICACIÓN.

La industria maquiladora constituye un pilar fundamental en la economía mexicana, particularmente en Ciudad Juárez, donde se tienen 330 plantas maquiladoras que generan más de 337,000 empleos directos, representando cerca del 11% del total nacional del sector (IMMEX, 2022) y la contribución económica representan aproximadamente el 9% del total de exportaciones manufactureras de México, con una derrama económica anual estimada en 13.5 mil millones de dólares (García-Alcaraz et al., 2022). El sector ha tenido un crecimiento del 5.2% anual en los últimos cinco años, constituyéndose como el motor principal del desarrollo económico fronterizo (Alcaraz et al., 2022).

La justificación de este estudio se hace desde diferentes enfoques:

Justificación Científica-Teórica. Si bien existen estudios sobre LM y sustentabilidad aisladamente, hay escasa investigación que integre sistemáticamente la medición del impacto de herramientas específicas de manufactura esbelta en las tres dimensiones de sustentabilidad simultáneamente. La originalidad de este estudio radica en el desarrollo de un marco teórico integrador que cuestiona el paradigma tradicional enfocado exclusivamente en beneficios económicos, expandiendo la comprensión hacia un modelo tridimensional (económico-ambiental-social) en el contexto específico de maquiladoras mexicanas, contribuyendo significativamente al avance de la teoría de la manufactura sostenible (García-Alcaraz et al., 2022; Reza et al., 2021)

Justificación Metodológica. Muchos estudios analizan las relaciones de LM con la sustentabilidad usando técnicas estadísticas como SEM, las cuales no son suficientes al ser modelos estáticos. La integración innovadora de SEM con SD es una metodología que supera las limitaciones individuales de cada técnica. Mientras SEM proporciona un análisis estático de relaciones causales entre variables, SD complementa con proyecciones temporales y simulación de escenarios dinámicos (Forrester, 2003; Forrester, 2016). Este enfoque multidisciplinario fusiona estadística avanzada que permiten identificar qué herramientas impactan cada dimensión de sustentabilidad y proyectar cuándo se alcanzan estos beneficios, ofreciendo una visión temporal inaccesible mediante métodos tradicionales.

Justificación Práctica. Las maquiladoras enfrentan el desafío de implementar herramientas de LM eficientemente para obtener retornos óptimos en sustentabilidad. Este estudio resolverá problemas prácticos al proporcionar una guía fundamentada empíricamente para la selección y secuenciación de herramientas lean según objetivos específicos de sustentabilidad, permitiendo a los gerentes tomar decisiones informadas sobre asignación de recursos e inversiones en iniciativas lean con base en resultados esperados y marcos temporales realistas para su obtención.

Justificación Económica. La implementación óptima de LM tiene el potencial de generar ahorros significativos para la industria maquiladora. Estimaciones conservadoras basadas en estudios previos sugieren reducciones de costos operativos entre 15-30% mediante la implementación estratégica de herramientas lean específicas (Maldonado-Guzmán et al., 2023).

Justificación Ambiental. LM se enfoca en reducir desperdicios, por lo que su correcta implementación contribuye a la conservación de recursos naturales. Estudios recientes documentan disminuciones promedio de 30% en consumo energético, 25% en utilización de agua y 40% en generación de residuos sólidos tras la implementación de programas integrales de manufactura esbelta (Piętko & Bogacz, 2024). Este proyecto cuantificará las relaciones de las herramientas de LM con la ENS, alineándose con compromisos nacionales de reducción de emisiones y gestión sostenible de recursos.

Justificación Social. SOS representa un aspecto frecuentemente subestimado en la implementación de LM. Esta investigación abordará directamente cómo estas herramientas de

LM mejoran la calidad de vida laboral mediante entornos más seguros, mayor participación en toma de decisiones y desarrollo profesional. Considerando que la industria maquiladora emplea a más del 60% de la población económicamente activa en Ciudad Juárez, los beneficios sociales potenciales impactarían directamente a aproximadamente 300,000 trabajadores y sus familias.

Justificación Estratégica. Este proyecto se alinea perfectamente con el Plan Nacional de Desarrollo Industrial 2022-2030, específicamente con su eje estratégico de "Transformación Digital y Manufactura Avanzada", y con iniciativas regionales de competitividad industrial fronteriza. Los resultados fortalecerán posiciones estratégicas en cadenas globales de valor, particularmente relevantes ante reconfiguraciones geopolíticas comerciales que favorecen el nearshoring, posicionando a Ciudad Juárez como hub de excelencia en manufactura sostenible.

Justificación de Capacidad. Mi trayectoria investigativa me posiciona idealmente para este estudio, con más de 15 publicaciones indexadas en Scopus/WoS relacionadas directamente con LM y sustentabilidad en entornos industriales. Actualmente cuento con acceso a bases de datos como Sciencedirect, Scopus, Springer, entre otras. Además, contamos con licencias de los softwares SPSS 26 para análisis estadístico, WarpPLS 8.0 para SEM y Stella Architect para simulación de SD.

METODOLOGÍA

Las actividades para esta investigación se agrupan en dos etapas: en la primera etapa, el objetivo era obtener las relaciones entre las variables entre las herramientas de LM y la sustentabilidad mediante un SEM, y en la segunda etapa, se simulan esas variables y sus relaciones a lo largo del tiempo usando SD.

Etapas 1. Modelos de ecuaciones estructurales (SEM)

Aunque el entregable de este año sabático son dos artículos, se generan varios SEM y algunos se encuentran en <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.28828808>. Para validar las hipótesis en los SEM, se requiere información de los gerentes de LM y se diseñó un cuestionario. Primero, se llevó a cabo una revisión de literatura, ya que muchas herramientas de LM y sustentabilidad han sido analizadas previamente. Sin embargo, dado que se habían realizado en otros países, se aplicó una validación por jueces para adaptarla al entorno de Ciudad Juárez (tres académicos, tres gerentes y un consultor). Esos jueces evaluaron la adecuación, la relevancia, la claridad, la precisión y la objetividad, y la validez de la forma mediante la longitud, el formato, la claridad de las instrucciones, el tipo de respuesta y la presentación de las preguntas. Se estableció un cuestionario final después de tres rondas de validación con los jueces (Actividad realizada, ver cuestionario en <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.28828808>).

Se identificaron los posibles encuestados con apoyo de la Industria Manufacturera, Maquiladora y de Servicios de Exportación (IMMEX) de Ciudad Juárez, centrándose en los gerentes e

ingenieros que tuvieran al menos dos proyectos de LM implementados para garantizar que conocían los resultados sustentables. El cuestionario contenía dos secciones: la primera era opcional y se refería a información demográfica; la segunda se refería a los ítems que integraban cada herramienta de LM y sustentabilidad, y su respuesta era obligatoria para evitar problemas de valores perdidos y debía responderse en una escala Likert de cinco puntos.

El cuestionario se administra a través de una plataforma electrónica (Google Forms), donde se informa al encuestado que sus datos se utilizarán de forma agrupada para informes académicos y científicos, que se seguirían todas las normas de la Declaración de Helsinki sobre privacidad y seguridad de la información facilitada, y que el proyecto había sido autorizado por el Comité de Ética en Investigación de una institución educativa. Si el encuestado aceptaba participar, se le permitía acceder a la primera sección del cuestionario; en caso contrario, se le enviaba al final del mismo.

Se envió un correo electrónico con un enlace de acceso activo a los posibles encuestados el 15 de marzo de 2025 y el 15 de junio de 2025 se cerrará, existiendo hasta este momento 411 respuestas. Para determinar el tamaño de muestra se utilizarán los coeficientes mínimos de las regresiones del SEM en base a los métodos de la raíz cuadrada inversa y gamma-exponencial propuestos por Kock and Hadaya (2018).

Para validaciones preliminares, se han descargado las 411 respuestas en formato CSV para su análisis en Excel y, posteriormente, en el software SPSS v.26 para su depuración, centrándose en la identificación de valores extremos mediante la estandarización de los ítems, donde los valores superiores a cuatro en valor absoluto se sustituyeron por la mediana (Li et al., 2020).

Para determinar la importancia que los encuestados asignan individualmente a los ítems, se obtiene la mediana como medida de tendencia central considerando los datos agrupados, donde los valores altos indican un alto nivel de rendimiento de la actividad y los valores bajos indican un bajo nivel de rendimiento (Tug et al., 2020). Además, se obtuvo el rango intercuartílico (IQR) como medida de dispersión, donde los valores altos indicaban un bajo consenso entre los encuestados, mientras que los valores bajos indicaban un alto consenso y una baja variación. Esta actividad tiene un avance preliminar, ya que la encuesta aún se encuentra abierta.

Antes de iniciar el análisis, se validarán estadísticamente las herramientas de LM y sustentabilidad, obteniendo los valores R cuadrado y R cuadrado ajustado para medir la validez predictiva paramétrica ($> 0,02$), Q cuadrado para la validez predictiva no paramétrica (> 0 y similar a R cuadrado), alfa de Cronbach para medir la consistencia interna ($> 0,7$), la varianza media extraída (AVE) para medir la validez convergente ($> 0,5$) y los índices de inflación de la varianza (VIF) para medir la colinealidad entre variables ($< 3,3$) (Kock, 2021). Es importante mencionar que algunos de estos índices se obtendrán de manera iterativa, ya que la eliminación de algunos mejora sus valores.

Las variables validadas se integrarán en el SEM que se evaluará utilizando el enfoque de mínimos cuadrados parciales (PLS), tal y como se recomienda cuando se obtiene información en escalas ordinales, existe una falta de normalidad en los datos o las muestras son pequeñas y se usa el software WarpPLS v.8. Antes de interpretar el PLS-SEM, se verificará que cumpla con los índices de eficiencia, como el coeficiente de ruta promedio (APC), el R cuadrado promedio (ARS) y el R cuadrado ajustado promedio (AARS) para medir la validez predictiva; los índices de inflación de la varianza de bloque promedio (AVIF) y el VIF de colinealidad total promedio (AFVIF) para medir la colinealidad; y el índice de GoF de Tenenhaus (GoF) para medir el ajuste de los datos al modelo (Kock, 2021). En este estudio, se presentan los resultados de la prueba de Jarque-Bera para comprobar la normalidad de las variables latentes (Kock, 2019).

Se obtendrán los efectos directos utilizando PLS-SEM para validar las hipótesis propuestas en los modelos (ver modelos propuestos en <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.28828808>). Los efectos se validarán estadísticamente obteniendo un parámetro β estandarizado, y se probará la hipótesis nula $H_0: \beta=0$ frente a la hipótesis alternativa $H_1: \beta \neq 0$ con un nivel de confianza del 95 %. Si se demuestra estadísticamente que $\beta \neq 0$, se concluye que existe una relación entre las variables (herramientas de LM y sustentabilidad). Además, se informa del tamaño del efecto (ES) para cada relación como medida de la varianza explicada

En este estudio, se utilizaron los valores de los efectos directos para generar las ecuaciones de dependencia entre las variables analizadas en la fase de dinámica de sistemas. Sin embargo, también se informa la suma de los efectos indirectos a través de variables mediadoras en dos o más segmentos. Por último, se reportan los efectos totales, que son la suma de los efectos directos e indirectos entre las dos variables. La validación estadística de los efectos indirectos y totales se realizará de la misma manera que para los efectos directos (ver los modelos propuestos en <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.28828808>).

Etapas 2. Dinámica de sistemas

El PLS-SEM valida las relaciones causales entre las variables observadas y latentes a través de un modelo teórico, mientras que el SD explorará cómo estas relaciones influyen en el comportamiento de un sistema a lo largo del tiempo; es decir, nos indicará cuando las LM nos proveen de sustentabilidad aceptable. Estas metodologías pueden complementarse entre sí, ya que el SEM permite cuantificar las relaciones causales y el SD puede simular el comportamiento a lo largo del tiempo, mejorando así la comprensión de sistemas complejos. La combinación de estas herramientas se ha utilizado para simular el comportamiento del efecto de las herramientas de fabricación ajustada en la sostenibilidad en la industria maquiladora (José Roberto Díaz-Reza, Jorge Luis García-Alcaraz, et al., 2024; José Roberto Díaz-Reza, S. Hooman Mousavi, et al., 2024) para evaluar los factores críticos de los desbordamientos del sistema de alcantarillado (Mohandes et al., 2022)) y para evaluar los sistemas de calidad en las universidades de los países en desarrollo (Kara, 2018). Uno de esos estudios es de nuestra autoría.

El DS tiene varias etapas, como se indica a continuación.

1. Definición del problema

El problema identificado es la dificultad de predecir cuándo se obtendrán los beneficios de la implementación de LM en forma de sustentabilidad. Aunque los estudios actuales utilizan encuestas y técnicas estadísticas para analizar las relaciones entre las herramientas de LM y la sustentabilidad, estas metodologías deben captar plenamente la dinámica de los sistemas abiertos de los sistemas productivos, en los que las condiciones pueden cambiar con el tiempo debido a la retroalimentación del entorno y decisiones tomadas diariamente. Este estudio combina SEM y SD para comprender cómo evolucionan las herramientas de LM y generan a través del tiempo la sustentabilidad, teniendo en cuenta la retroalimentación y las complejas interacciones dentro del sistema.

2. Conceptualización y formulación del modelo

Para observar el comportamiento a largo plazo de las herramientas de LM en la sustentabilidad, se propusieron dos modelos: uno con herramientas de calidad y otro con aquellas enfocadas a las máquinas (ver <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.28828808>), en los que se plantearon hipótesis, y sus respectivos modelos de retroalimentación, en el que se plantean las hipótesis en sentido inverso, para captar la retroalimentación de estos efectos. A partir de la información de estas dos figuras, se creó un diagrama causal (CLD) en el que se presentan los bucles de retroalimentación.

3. Modelo de retroalimentación

Considerando el modelo propuesto y de retroalimentación, se definen los bucles y el sentido de los mismos, los cuales giran en torno a cada variable herramienta de LM e involucran variables como la brecha (diferencia entre el nivel deseado y el nivel alcanzado en un momento específico), el nivel deseado (nivel a alcanzar, preferiblemente 1, que equivale al 100 %) y, por último, los ajustes (actividades realizadas para aumentar el nivel deseado y reducir la brecha). Ver los modelos de retroalimentación en <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.28828808>.

4. Validación y simulación

Las ecuaciones generadas en el PLS-SEM del modelo propuesto y de retroalimentación se introducen para validar el modelo. En este estudio se crearán las ecuaciones a partir de la suma de los efectos directos de las variables independientes latentes sobre las variables dependientes, multiplicados por los pesos de los elementos de cada variable dependiente. Una vez establecidas las ecuaciones para todas las variables, se validarán utilizando el software Stella Architect V.3.1.1 (2688), que se ha utilizado para analizar cadenas de suministro y sistemas abiertos (Yusuf, 2023), y que se ha elegido por su simplicidad y el tipo de informes que genera (Badie et al., 2023) Para realizar la simulación, se proponen diferentes escenarios en los que se establecen los periodos de simulación y los valores iniciales de las herramientas de LM. Inicialmente, se simularán escenarios a cinco años, con valores iniciales de 0.1 para el nivel de implementación.

5. Análisis e interpretación

Para el análisis y la interpretación de los resultados, se utilizarán gráficos y tablas para resumir el comportamiento de las herramientas de LM y las dimensiones de la sustentabilidad a lo largo del tiempo. En estos gráficos y tablas se establecen y discuten diferentes escenarios de simulación.

ESPECIFICAR EL COMPROMISO DE LA INSTITUCIÓN RECEPTORA EN INFRAESTRUCTURA PARA EL DESARROLLO DE LA ESTANCIA.

INDICAR EL PROGRAMA NACIONAL ESTRATÉGICO (PRONACE) O LA LINEA DE GENERACION Y/O APLICACIÓN DEL CONOCIMIENTO (LAGC) AL QUE SE ENCUENTRA RELACIONADO EL TEMA DEL PROYECTO.

Este proyecto soporta al Sistemas Socioecológicos y Sustentabilidad (SSyS) del gobierno federal y al programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Avanzada y su LGAC de Proceso de Producción (sub-líneas de Manufactura esbelta y Sustentabilidad Industrial).

DESCRIBIR DE QUE MANERA EL PROYECTO SE ENCUENTRA VINCULADO CON EL PROGRAMA NACIONAL ESTRATÉGICO O LA LINEA DE GENERACION Y/O APLICACIÓN DEL CONOCIMIENTO INDICADO.

Mi proyecto se vincula directamente con la LGAC de Procesos de Producción del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Avanzada y con el Programa Nacional Estratégico en el eje de Desarrollo Sustentable mediante las siguientes contribuciones estratégicas.

Respecto a la LGAC de Procesos de Producción, el proyecto fortalece directamente las sub-líneas de manufactura esbelta y sustentabilidad industrial al desarrollar un marco metodológico innovador que evalúa sistemáticamente el impacto de herramientas específicas de lean manufacturing en las tres dimensiones de la sustentabilidad. A diferencia de estudios previos que consideran las herramientas lean como un conjunto homogéneo, esta investigación las analiza individualmente, permitiendo identificar cuáles generan mayor impacto en cada dimensión, enriqueciendo así el corpus teórico-práctico de la LM con enfoque sustentable. La integración metodológica de SEM con SD representa una innovación significativa para la LGAC, estableciendo un protocolo replicable que permite no solo identificar relaciones causales entre herramientas de LM y sustentabilidad, sino también proyectar su evolución temporal, respondiendo tanto al "qué" como al "cuándo" de estas intervenciones organizacionales.

El proyecto se alinea con el PRONACE de Sistemas Socioecológicos y Sustentabilidad (SSyS), generando conocimiento transdisciplinario que integra lo económico, ambiental y social para impulsar sistemas productivos más sostenibles. Aborda a la maquila como un sistema complejo

donde las herramientas lean promueven modelos industriales más sustentables, en línea con los objetivos del PRONACE.

Contribuciones clave del proyecto:

Transición industrial sustentable: Evidencia el impacto de las herramientas lean en las tres dimensiones de la sustentabilidad.

Resiliencia productiva: Estudio del sector maquilador de Ciudad Juárez (330 plantas, 337,000 empleos) para fortalecer su sostenibilidad al eliminar desperdicios.

Optimización de recursos: Reducciones de desperdicios, tales como materias primas y energía.

Bienestar social: Mejora en condiciones laborales, participación y desarrollo profesional, fomentando la sustentabilidad social.

Con una metodología que combina SEM y SD, el proyecto ofrece herramientas para decisiones sustentables y aporta conocimiento aplicable a la transformación de los sistemas productivos fronterizos, en línea con los objetivos del PRONACE SSyS.

ESPECIFIQUE SI SE CUENTA CON ALGUN ACUERDOS DE COLABORACION CON INSTITUCION(ES) O INSTANCIA(S) MEXICANA(S) PARA EL DESARROLLO EN CONJUNTO DEL PROYECTO (EN CASO DE NO APLICAR ESTERUBRO DEBERA IN DICARLO).

No se cuenta con acuerdos de colaboración específica. Se tiene un acuerdo de colaboración entre la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez y la Universidad Autónoma de Baja California, el cual es genérico y en el marco del mismo, se desarrolla colaboración conjunta (ver acuerdo en <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.28828808>).

GRUPO DE INVESTIGACIÓN AL QUE SE VINCULA. NOMBRE DE LOS INTEGRANTES, INSTITUCIÓN DE ADCRIPCIÓN.

Los integrantes del Cuerpo académico “Procesos Productivos y Diseño Ergonómico” dela UACJ, y sus integrantes son:

1. Liliana Avelar Sosa, CVU: 419990
2. José Manuel Mejía Muñoz, CVU: 240661
3. Juan Luis Hernández Arellano, CVU: 44640

Sin embargo, en este proyecto también colaboran los siguientes estudiantes:

4. José Roberto Diaz Reza (posdoctorante), CVU: 548515
5. Ingrid Iovana Burgos Espinoza (Doctorado), CVU: 548515
6. Joel Quintana Alvarado (Maestría), CVU: 1333347

BIBLIOGRAFÍA (ver lista completa en <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.28828808>)

- Alcaraz, J. L. G., Reza, R. D., Macías, E. J., Vidal, R. P. I., Montalvo, F. J. F., & Ledesma, A. S. T. (2022). Effect of the Sustainable Supply Chain on Business Performance— The Maquiladora Experience. *IEEE Access*, 10, 40829-40842. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3166193>
- Badie, N., Hussin, A. R. C., Yadegaridehkordi, E., Singh, D., & Lashkari, A. H. (2023). A SEM- STELLA approach for predicting decision-makers' adoption of cloud computing data center. *Education and Information Technologies*, 28(7), 8219-8271. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11484-9>
- Díaz-Reza, J. R., García-Alcaraz, J. L., Figueroa, L. J. M., Vidal, R. P. i., & Muro, J. C. S. D. (2022). Relationship between lean manufacturing tools and their sustainable economic benefits. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(3), 1269-1284. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10208-0>
- Díaz-Reza, J. R., García-Alcaraz, J. L., Sánchez-Ramírez, C., & Vargas, A. R. (2024). Assessing the impact of Lean manufacturing on the Social Sustainability through Structural Equation Modeling and System Dynamics. *JJMIE*, 81(1).
- Díaz-Reza, J. R., Mousavi, S. H., Sánchez-Ramírez, C., & García-Alcaraz, J. L. (2024). Achieving social sustainability through lean manufacturing practices: Insights from structural equation model and system dynamics [Article]. *Journal of Cleaner Production*, 448, Article 141453. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141453>
- Díaz-Reza, J. R., Mousavi, S. H., Sánchez-Ramírez, C., & García-Alcaraz, J. L. (2024). Achieving social sustainability through lean manufacturing practices: Insights from structural equation model and system dynamics. *Journal of Cleaner Production*, 448, 141453. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141453>
- Figueroa, L. J. M., García-Alcaraz, J. L., Osman, A. I., López, A. J. G., Aryanfar, Y., Sillanpää, M., & Assad, M. E. H. (2024). Measuring Impact of Lean Manufacturing Tools for Continuous Improvement on Economic Sustainability [Article]. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 33(4), 452-474. <https://doi.org/10.1007/s11518-023-5588-2>
- Forrester, J. W. (2003). Dynamic models of economic systems and industrial organizations. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, 19(4), 329-345.
- Forrester, J. W. (2016). Learning through System Dynamics as Preparation for the 21st Century [Note]. *System Dynamics Review*, 32(3-4), 187-203. <https://doi.org/10.1002/sdr.1571>
- García-Alcaraz, J. L., Morales García, A. S., Díaz-Reza, J. R., Jiménez Macías, E., Javierre Lardies, C., & Blanco Fernández, J. (2022). Effect of lean manufacturing tools on sustainability: the case of Mexican maquiladoras [Article]. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(26), 39622-39637. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18978-6>

- García Alcaraz, J. L., Díaz Reza, J. R., Arredondo Soto, K. C., Hernández Escobedo, G., Happonen, A., Puig I Vidal, R., & Jiménez Macías, E. (2022). Effect of Green Supply Chain Management Practices on Environmental Performance: Case of Mexican Manufacturing Companies [Article]. *Mathematics*, 10(11), Article 1877. <https://doi.org/10.3390/math10111877>
- García Alcaraz, J. L., Morales García, A. S., Díaz Reza, J. R., Blanco Fernández, J., Jiménez Macías, E., & Puig I Vidal, R. (2022). Machinery Lean Manufacturing Tools for Improved Sustainability: The Mexican Maquiladora Industry Experience [Article]. *Mathematics*, 10(9), Article 1468. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/math10091468>
- IMMEX. (2022). *Statistical Information Monthly Report - Inputs consumed by IMMEX companies*. A. d. M. A. C.-I. Juárez. <https://indexjuarez.com/wp-content/uploads/2022/05/27-de-Mayo.pdf>
- Kara, A. (2018). Escaping mediocre-quality, low-productivity, low-performance traps at universities in developing countries: A human capital-based structural equation model with system-dynamics simulations [Article]. *Kuram ve Uygulamada Egitim Bilimleri*, 18(3), 541-559. <https://doi.org/10.12738/estp.2018.3.0255>
- Kock, N. (2019). From composites to factors: Bridging the gap between PLS and covariance-based structural equation modelling. *Information Systems Journal*, 29(3), 674-706. <https://doi.org/10.1111/isj.12228>
- Kock, N. (2021). *WarpPLS User Manual: Version 7.0*. ScriptWarp Systems.
- Kock, N., & Hadaya, P. (2018). Minimum sample size estimation in PLS-SEM: The inverse square root and gamma-exponential methods. *Information Systems Journal*, 28(1), 227-261. <https://doi.org/10.1111/isj.12131>
- Li, H., Wang, B., & Xie, X. (2020). An improved content-based outlier detection method for ICS intrusion detection. *EURASIP Journal on Wireless Communications & Networking*, 2020(1), 1-15. <https://doi.org/10.1186/s13638-020-01718-0>
- Maldonado-Guzmán, G., Pinzón-Castro, S. Y., & Juárez-Del Toro, R. (2023). Lean manufacturing is the financial performance and sustainable finances problems solution? [Article]. *Tec Empresarial*, 17(3), 1-19. <https://doi.org/10.18845/te.v17i3.6846>
- Mohandes, S. R., Kineber, A. F., Abdelkhalek, S., Kaddoura, K., Elsayed, M., Hosseini, M. R., & Zayed, T. (2022). Evaluation of the critical factors causing sewer overflows through modeling of structural equations and system dynamics [Article]. *Journal of Cleaner Production*, 375, Article 134035. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134035>
- Piętka, K., & Bogacz, P. (2024). Lean Green – Integration of Lean Manufacturing and Sustainable Development in the Light of the Pursuit of Economically and Environmentally Efficient Operations [Article]. *Inzynieria Mineralna*, 53(2), 211-218. <https://doi.org/10.29227/IM-2024-01-111>
- Reza, J. R. D., García-Alcaraz, J. L., Medina, M. A. R., Vargas, A. R., Soto, K. C. A., & Macias, E. G. (2021). Role of Lean manufacturing tools on economic sustainability in the Mexican manufacturing industry. 33rd European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2021,

- Reza, J. R. D., García Alcaraz, J. L., Ramírez, C. S., López, J. A. G., Vargas, A. R., & Rodríguez Álvarez, J. L. (2025). Achieving strategic goals by continuous improvement and lean manufacturing implementation: A structural equation model -system dynamics approach [Article]. *Sustainable Futures*, 9, Article 100551.
<https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100551>
- Tug, T., Ickstadt, K., Kunz, M., Sutter, A., & Igl, B.-W. (2020). Statistical analysis of in vivo alkaline comet assay data - Comparison of median and geometric mean as centrality measures. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 118, 104808.
<https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2020.104808>
- Yusuf, I. (2023). Model the complexities in inventories: the case of Tradeasia [Article]. *Emerald Emerging Markets Case Studies*, 13(4), 1-27.
<https://doi.org/10.1108/EEMCS-11-2022-0435>