

DISEÑO DE UNA COSECHADORA MECÁNICA PARA ARÁNDANO EN TÚNELES DE CULTIVO

Aldo Alcalá Cibrián¹, Angélica Janeth Horta Aguilar², Víctor Manuel Langarica Rivera

^{1 2 3}Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y
Henríquez Unidad Académica Tamazula

Resumen - El cultivo de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) ha adquirido una creciente relevancia económica en México; no obstante, la cosecha continúa realizándose mayoritariamente de forma manual, lo que incrementa los costos de producción y limita la eficiencia operativa. El presente trabajo aborda el diseño de una cosechadora mecánica específicamente adaptada a las condiciones físicas y productivas del cultivo en túneles. La metodología incluyó el análisis biomecánico de la planta y del fruto, el diagnóstico de las restricciones espaciales del sistema productivo y la aplicación de criterios de ingeniería mecánica para el dimensionamiento estructural y funcional del equipo. El diseño integra un sistema vibratorio controlado para el desprendimiento del fruto, un conjunto motriz adecuado y un sistema de recolección mediante banda transportadora plástica, seleccionando materiales ligeros y resistentes. Los resultados preliminares indican que la propuesta es funcional, segura y con potencial para incrementar la productividad y reducir la dependencia de mano de obra en la cosecha de arándano en túnel.

Palabras clave: Arándano, mecanización agrícola, modelado mecánico, innovación tecnológica.

constraints of the production system, and the application of mechanical engineering criteria for the structural and functional dimensioning of the equipment. The design integrates a controlled vibratory system for fruit detachment, a suitable drive unit, and a collection system using a plastic conveyor belt, selecting lightweight and resistant materials. Preliminary results indicate that the proposal is functional, safe, and has the potential to increase productivity and reduce labor dependence in tunnel blueberry harvesting.

Keywords: Blueberry, agricultural mechanization, mechanical modeling, technological innovation.

I. INTRODUCCIÓN

El arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) se ha consolidado como uno de los cultivos de mayor dinamismo y rentabilidad en la industria agroalimentaria global, impulsado por su perfil nutracéutico y su alta demanda en mercados internacionales [1]. México ha capitalizado esta oportunidad, posicionándose como el quinto productor mundial y logrando exportaciones que superan los 700 millones de dólares anuales [2]. Este crecimiento ha sido posible gracias a la adopción de tecnologías como la producción bajo macrotúneles, los cuales permiten proteger el cultivo de adversidades climáticas, adelantar la cosecha hasta 25 días y optimizar la calidad del fruto mediante un microclima controlado [3].

A pesar de los avances en la fase productiva, el sector presenta una vulnerabilidad crítica en la etapa de recolección. Actualmente, la cosecha de arándano en México se realiza predominantemente de forma manual, una labor que exige alta precisión para evitar daños en la pruina y en la integridad física del fruto. Sin embargo, este modelo enfrenta limitaciones estructurales asociadas a la variabilidad en la calidad del producto, la dependencia intensiva de mano de obra y el incremento sostenido de los costos laborales [4]. Además, el déficit de jornaleros agrícolas en el sector de las berries representa un riesgo creciente para la sostenibilidad del sistema productivo [5].

Ante este escenario, la mecanización de la cosecha se perfila como una necesidad estratégica para mantener la competitividad del cultivo. Si bien existen cosechadoras de gran escala empleadas en otros países, estas no resultan compatibles con las condiciones físicas de los túneles ni con la sensibilidad de las variedades cultivadas en México. En este sentido, el

¹ Aldo Alcalá Cibrián, Docente del departamento de Innovación Agrícola Sustentable. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula. aldo.alcala@tamazula.tecmm.edu.mx

² Angelica Janeth Horta Aguilar, Docente del departamento de Innovación Agrícola Sustentable. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula. angelica.horta@tamazula.tecmm.edu.mx

³ Victor Manuel Langarica Rivera, Docente del departamento de Innovación Agrícola Sustentable. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula. victor.langarica@tamazula.tecmm.edu.mx

Abstract - Blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) cultivation has gained increasing economic importance in Mexico; however, harvesting continues to be carried out primarily manually, which increases production costs and limits operational efficiency. This work addresses the design of a mechanical harvester specifically adapted to the physical and productive conditions of tunnel blueberry cultivation. The methodology included biomechanical analysis of the plant and fruit, diagnosis of the spatial

desarrollo de equipos compactos que incorporan sistemas de vibración controlada para el desprendimiento selectivo del fruto maduro representa una de las principales líneas de innovación tecnológica en la agricultura protegida [6].

I. DESARROLLO DEL TEMA

El desarrollo metodológico del proyecto se estructuró en varias fases complementarias orientadas a garantizar la validez técnica del diseño, la pertinencia agronómica y la coherencia mecánica del diseño propuesto. La metodología combina análisis biomecánico, fundamentos de ingeniería mecánica, modelado tridimensional, comparativa con tecnologías comerciales y una etapa de retroalimentación técnica que permitió corregir y enriquecer el diseño final

A. Análisis biomecánico.

La biomecánica de la planta de arándano es fundamental para el diseño de una cosechadora mecánica eficiente. Las plantas de arándano presentan una estructura delicada que requiere un manejo cuidadoso durante la cosecha para evitar daños que puedan afectar la calidad y la productividad de los cultivos. Según estudios, la biomecánica vegetal proporciona información valiosa sobre la resistencia de los tallos, la estructura de la planta y los puntos de ruptura, lo que es fundamental para diseñar mecanismos de recolección que minimicen el daño a la planta y a la fruta [7,8].

1. Sistemas de Vibración

Uno de los métodos más comunes para la cosecha mecanizada de arándanos es el uso de sistemas de vibración. Estos sistemas agitan las plantas para desprender los frutos, que luego son recogidos mediante diferentes mecanismos de recolección. Los estudios han demostrado que la frecuencia y amplitud de las vibraciones deben ser cuidadosamente ajustadas para minimizar el daño a las plantas y a los frutos. Investigaciones recientes han desarrollado sistemas de vibración más precisos y controlados electrónicamente para mejorar la eficiencia y reducir el daño [8,9].

El proceso inició con un reconocimiento detallado de las condiciones reales del cultivo de arándano en túneles. Este diagnóstico permitió establecer las restricciones operativas que condicionan el diseño de cualquier maquinaria agrícola en este entorno [7].

Durante el reconocimiento del área de cultivo se realizó la medición de la altura y el ancho del túnel, así como la separación entre hileras, con el fin de establecer las

dimensiones y restricciones espaciales para el diseño de la cosechadora (ver figura 1). Se determinó también la altura promedio de las plantas (≈ 1.40 m) y el ancho de los pasillos (1.3 m), elementos esenciales para definir la altura de trabajo del sistema vibratorio y el tamaño máximo del prototipo [5].



Figura 1 Dimensión de pasillo y planta de arándano

Asimismo, se registró el estado fenológico del cultivo y se documentaron las variedades sembradas, evaluando su respuesta ante vibraciones controladas (ver figura 2). De manera complementaria, se analizaron las prácticas actuales de cosecha manual, incluyendo tiempos, rendimiento y costos, con el objetivo de establecer una base comparativa frente a la alternativa mecanizada propuesta.



Figura 2 Dimensión de arándanos promedio.

La fuerza aplicada para el desprendimiento del fruto debe ser precisa y moderada, dado que el arándano es altamente susceptible a daños mecánicos. Diversos estudios reportan que la fuerza de desprendimiento se encuentra en un rango aproximado de 0.3 a 1 N, dependiendo del grado de madurez y de la variedad [8,9].

Factores a Considerar al Aplicar Fuerza:

1. Madurez del Fruto: Arándanos más maduros requieren menos fuerza para desprenderse, mientras que los menos maduros necesitan una fuerza ligeramente mayor.
2. Variedad de Arándano: Algunas variedades tienen un apego más fuerte al tallo, lo que requiere ajustar ligeramente la fuerza de desprendimiento.

B. Fundamentos de ingeniería mecánica.

El diseño mecánico (ver figura 3) de la cosechadora se fundamentó en principios y normas de ingeniería para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente dentro de los túneles de cultivo. Primero se realizó un análisis de resistencia de materiales para dimensionar la estructura y asegurar que soportara esfuerzos, vibraciones y cargas dinámicas sin fallas ni deformaciones. Sección propuesta: RHS 120 × 60 × 5 mm [10,11].

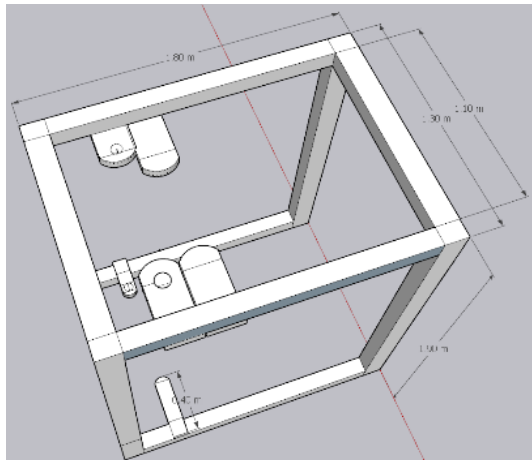


Figura 3 Vista superior de la Estructura principal de la cosechadora.

El mecanismo de desprendimiento se diseñó mediante un sistema leva-manivela (ver figura 5), calculando amplitudes, aceleraciones y oscilando su frecuencia de vibración entre 5 y 20 Hz de fuerza directa adecuadas para desprender el fruto sin comprometer la integridad de la planta (ver tabla 1) [8,9].

Tabla 1 Amplitud requerida para generar la fuerza de desprendimiento [7]

frecuencia f (Hz)	ω^2 (rad ² /s ²)	$m_f \omega^2$ (N/m)	A para $F_{des} = 0.3$ (m/mm)	A para $F_{des} = 1.0$ (m/mm)
5	986.96	3.01	0.0096 m = 9.6 mm	0.332 m = 332 mm
10	3.947.84	12.06	0.0249 m = 24.9 mm	0.0830 m = 83.0 mm
15	8.882.66	27.13	0.0111 m = 11.1 mm	0.0369 m = 36.9 mm
20	15.791.37	48.22	0.00622 m = 6.22 mm	0.0208 m = 20.8 mm

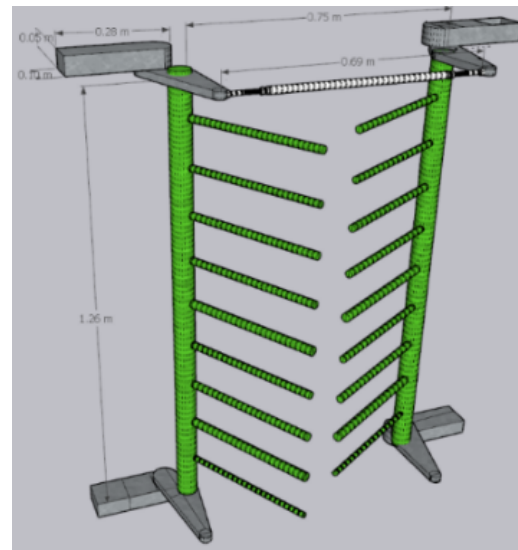


Figura 4 Sistema de Desprendimiento.

La transmisión de potencia se definió mediante poleas, cadenas y catarinas, seleccionadas conforme a las normas ANSI y ACA para asegurar una operación eficiente y confiable [12,13].

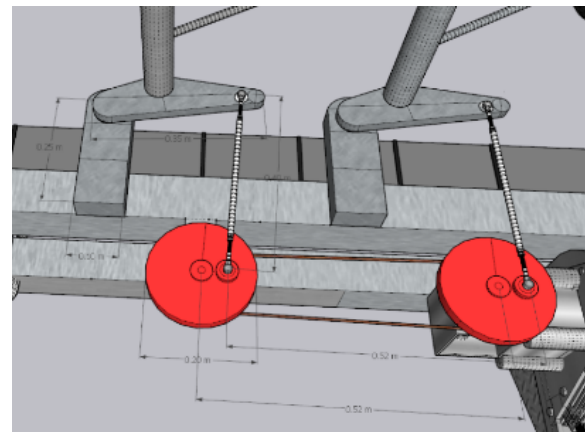


Figura 5 Sistema de poleas

El sistema motriz se integró a partir de un motor de 5 hp, capaz de accionar simultáneamente el sistema vibratorio, las bandas transportadoras y el desplazamiento del equipo, asegurando un suministro estable de energía durante la operación agrícola [14].

C. Modelado tridimensional

El modelado tridimensional del prototipo se realizó mediante el software AutoCAD, con el objetivo de representar con precisión la estructura de la cosechadora, sus mecanismos internos y la interacción entre componentes antes de su fabricación [15]. Este modelo permitió verificar dimensiones, holguras operativas y la viabilidad del desplazamiento del equipo dentro del espacio reducido del túnel (ver figuras 6).

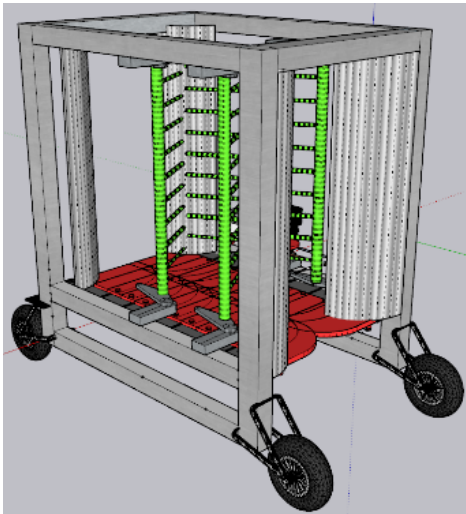


Figura 6 Vista isométrica

A partir del modelo 3D se efectuaron simulaciones mecánicas orientadas a evaluar el desempeño dinámico del sistema vibratorio, la distribución de esfuerzos y la resistencia de los componentes estructurales. El análisis de elementos finitos permitió comprobar que los esfuerzos máximos se mantuvieron por debajo del límite elástico de los materiales seleccionados, garantizando un factor de seguridad adecuado [16].

El uso conjunto del modelado tridimensional y la simulación permitió anticipar fallas potenciales, optimizar la geometría del sistema y mejorar la integración de los subsistemas, asegurando un diseño robusto y viable para las posteriores etapas de construcción y validación experimental (ver figura 7).

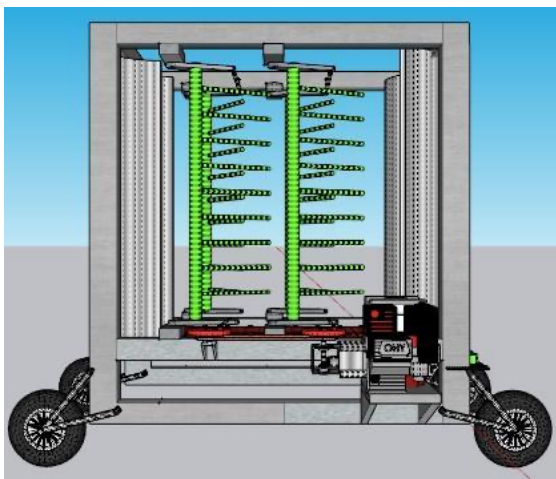


Figura 7 Vista lateral izquierda.

D. Comparación tecnológica con cosechadoras comerciales.

La evaluación comparativa con cosechadoras comerciales, como la JAGODA 300 y la OSKAR 4WD, evidenció que, aunque estas máquinas presentan alta eficiencia en plantaciones a cielo abierto, sus dimensiones, peso y requerimientos de potencia las hacen incompatibles con los túneles de cultivo [17,18]. En contraste, el diseño propuesto se adapta específicamente a las restricciones espaciales y biomecánicas del cultivo en túnel, lo que respalda la pertinencia del prototipo desarrollado.



Figura 8 Jacoda 300 [17].



Figura 9 Oskar 4WD [18].

II. RESULTADOS

El modelado y desarrollo de la cosechadora mecánica para arándano cultivado en túneles permitió obtener resultados relevantes en términos estructurales, funcionales y operativos, evidenciando la viabilidad técnica del equipo y su potencial impacto en la productividad agrícola. Los resultados se analizan considerando el desempeño del diseño estructural, el sistema motriz, el sistema de desplazamiento y el sistema de recolección (ver figura 10).

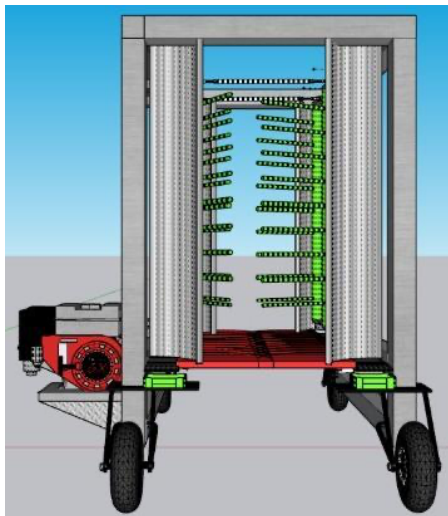


Figura 10 Vista frontal

El modelado estructural permitió definir una configuración compacta y ligera, adecuada para operar en túneles de cultivo con espacio limitado. La selección del perfil RHS $120 \times 60 \times 5$ mm de aleaciones de aluminio, aceros de alta resistencia y polímeros reforzados contribuyó a una reducción aproximada del 25 % del peso total respecto a diseños convencionales de maquinaria agrícola [11]. Esta reducción impacta positivamente en la maniobrabilidad del equipo y en la disminución de la compactación del suelo [14].

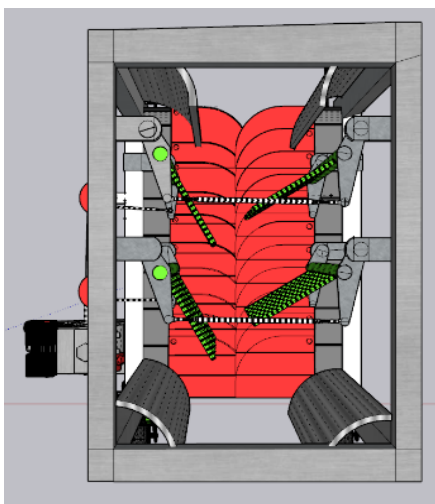


Figura 11 Vista superior

El análisis de elementos finitos (FEA) mostró una distribución uniforme de esfuerzos en la estructura principal, sin concentraciones críticas que comprometan la integridad del equipo. Los valores máximos de esfuerzo se mantuvieron por debajo del límite elástico de los materiales seleccionados, garantizando un factor de seguridad adecuado para condiciones normales de operación (ver figura 11) [14].

CONCLUSIONES

El desarrollo del modelo de una cosechadora mecánica para arándano plantado en túnel permitió establecer bases técnicas sólidas para la mecanización de la cosecha en sistemas de agricultura protegida. El análisis integral, desde la observación en campo hasta el diseño mecánico y la simulación computacional, demuestra la viabilidad de un equipo compacto y funcional capaz de integrarse a este tipo de infraestructura sin comprometer la calidad del fruto.

III. TRABAJO A FUTURO

El trabajo futuro se contempla la fabricación de un prototipo físico y la realización de pruebas experimentales para evaluar la eficiencia de desprendimiento, la integridad del fruto, la estabilidad estructural y el comportamiento dinámico del sistema vibratorio.

Agradecimientos

Agradecemos la cooperación y apoyo brindado por el Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Tamazula de Gordiano Jalisco, México y a los productores de la región que permitieron el acceso a los túneles de cultivo y compartieron información clave sobre las condiciones reales de producción, la biomecánica del cultivo y los retos asociados al proceso de cosecha del arándano. Su colaboración posibilitó la obtención de datos de campo indispensables para el diseño mecánico propuesto.

REFERENCIAS

- [1] FAO. (2022). World blueberry production and trade. FAO.
- [2] SADER. (2023). Panorama agroalimentario del arándano en México. Gobierno de México.
- [3] INIFAP. (2021). Producción de berries bajo agricultura protegida. INIFAP.
- [4] FAO. (2022). Agricultural labour and mechanization challenges. FAO.
- [5] SIAP. (2022). Demanda de mano de obra agrícola en México. SIAP.
- [6] García-Perales, O., & Valenzuela, J. (2020). Innovación tecnológica en la cosecha de berries. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 11(6), 1231–1244.
- [7] Peterson, D. L., Wolford, S. D., & Timm, E. J. (1998). Mechanical harvesting of blueberries. Applied Engineering in Agriculture, 14(3), 259–265.

- [8] Gallardo, R. K., & Zilberman, D. (2016). Blueberry mechanical harvesting systems and fruit quality. *HortScience*, 51(9), 1123–1129.
- [9] Li, P., et al. (2019). Vibration-based harvesting of small fruits. *Biosystems Engineering*, 184, 1–12.
- [10] Shigley, J. E., & Mischke, C. R. (1990). *Diseño en ingeniería mecánica*. McGraw-Hill.
- [11] AISC. (2016). *Steel Construction Manual*. AISC.
- [12] ANSI. (2018). *Roller Chain Standard ANSI B29.1*. ANSI.
- [13] ACA. (2017). *Chains for Power Transmission and Material Handling*. ACA.
- [14] Kepner, R. A., Bainer, R., & Barger, E. L. (2018). *Principles of Farm Machinery* (3rd ed.). AVI Publishing.
- [15] Autodesk, Inc. (2022). *AutoCAD User Guide*. Autodesk.
- [16] Logan, D. L. (2017). *A First Course in the Finite Element Method*. Cengage Learning.
- [17] JAGODA JPS Agromachines. (2021). *JAGODA 300 Mechanical Blueberry Harvester: Technical Specifications*. [18] Weremczuk FMR Sp. z o.o. (2020). *OSKAR 4WD Berry Harvester: Product Manual*.

Biografía Autores

Aldo Alcalá Cibrián. Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez –Unidad académica Tamazula, Jalisco, C.P 49650 email: aldo.alcala@tamazula.tecmm.edu.mx, Ing. Mecánico. Docente del departamento de Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable.

Angelica Janeth Horta Aguilar. Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez –Unidad académica Tamazula, Jalisco, C.P 49650 email: Angelica.horta@tamazula.tecmm.edu.mx, Ing. en Innovación Agrícola Sustentable. Docente del departamento de Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable.

Víctor Manuel Langarica Rivera. Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez –Unidad académica Tamazula, Jalisco, C.P 49650 email: victor.langarica@tamazula.tecmm.edu.mx, Ing. en Innovación Agrícola Sustentable. Docente del departamento de Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable.