



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE GUASAVE

T E S I S

**Construcción y evaluación de un prototipo de
máquina para pruebas de fuerza tensil en hojas de
árboles**

presentada por

Beltrán Camacho Jesús Rosario

como requisito para la obtención del grado de

Ingeniería Mecánica

Director de tesis

M.I. Rommel Arel Leal Palomares

Codirector de tesis

M.I. Malcom Irving Villanueva Portugal



	LIBERACIÓN DE PROYECTO PARA TITULACIÓN INTEGRAL PLAN 2015	Responsable: Jefatura de División de Ciencias
	Referencia a la Norma: ISO 9001:2015	Código: ITSG-SIG-AO-PO-19-03
	8.1 ;8.2.1;8.2.2;8.2.3;8.5.1;8.5.2;8.6;8.7.2	Revisión: 5
	Referencia a la Norma: ISO 21001:2018	Fecha de Emisión: Julio 2025
	8.1;8.1.1;8.1.2;8.2.1;8.2.2;8.2.3;8.3.3;8.3.4;8.6;8.7;9.1.2	Página 1 de 1

Guasave, Sinaloa, Fecha: 15 de Enero del 2026
ASUNTO: Liberación de proyecto para titulación integral

Ing. Laura Beatriz Inzunza Ramírez
COORDINACIÓN DE TITULACIÓN
PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Nombre del estudiante y/o egresado(a):	Jesús Rosario Beltrán Camacho
Carrera:	Ingeniería Mecánica
Número de control:	2125010233
Nombre del proyecto:	Construcción y evaluación de un prototipo de máquina para pruebas de fuerza tensil en hojas de árboles.
Producto:	Tesis

Solo para la Opción de tesis:

Estudiante y/o egresado(a):

CURP	BECJ030225HSLMSA6
------	-------------------

Asesor(a):

Nombre completo	Rommel Arel Leal Palomares
CVU	IT19B264

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros(as) egresados(as).

ATENTAMENTE

Ing. Jesús Guadalupe Delgado Félix

Nombre y firma del (de la) Jefe(a) de División de Ciencias Mecánicas

M.I. Rommel Arel Leal Palomares

M.I. Malcom Irving Villanueva Portugal

Ing. Jesús Alberto Machado Coronado

Nombre y firma del Asesor(a) Nombre y firma del Revisor(a) Nombre y firma del Revisor(a)

C. c. p. Expediente

Departamento de Centro de Recurso para el Aprendizaje e Innovación.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a las personas que hicieron posible la realización de este trabajo de tesis. Se agradece al Instituto Tecnológico Superior de Guasave, por brindar el espacio académico y los recursos necesarios. De igual manera, se reconoce el apoyo de mi director de tesis M.I. Rommel Arel Leal Palomares, también a mi codirector M.I. Malcom Irving Villanueva Portugal, cuyo acompañamiento, orientación y disposición fueron fundamentales para el desarrollo correcto de cada una de las etapas de la investigación.

Un agradecimiento especial a mi familia, cuyo respaldo incondicional, motivación y confianza hicieron posible culminar satisfactoriamente esta etapa académica y profesional.

RESUMEN

El presente proyecto tuvo como objetivo **construir y evaluar una máquina para pruebas de fuerza tensil en hojas de árboles**, con el fin de proporcionar una herramienta accesible, de bajo costo y replicable para el estudio de la resistencia mecánica de tejidos vegetales en ecosistemas costeros vulnerables, como los manglares. La investigación se fundamentó en principios de biomecánica vegetal y diseño mecánico asistido por computadora (CAD), utilizando software SolidWorks para el modelado tridimensional y simulaciones preliminares.

Durante el desarrollo se seleccionaron materiales locales y se integraron componentes mecánicos como husillo trapezoidal, guías lineales y mordazas especializadas, junto con un sistema de control basado en Arduino Nano y un dinamómetro digital para la adquisición de datos. Se estandarizaron probetas foliares de 50 × 10 mm y se evaluaron tres especies: *Persea americana* (Aguacate), *Ehretia tinifolia* (Mandinibo) y *Psidium guajava* (Guayabo), realizando 30 ensayos por especie.

Los resultados mostraron diferencias significativas en la resistencia tensil: Guayabo presentó el mayor promedio (4.80 N), seguido de Mandinibo (4.65 N) y Aguacate (3.04 N). El coeficiente de variación fue menor en Guayabo (6%), indicando mayor uniformidad estructural. La máquina demostró una eficiencia operativa entre 90% y 94%, con buena repetibilidad y precisión en el rango de fuerzas evaluado (0–50 N).

Se concluye que el prototipo desarrollado es funcional, replicable y adecuado para su uso en contextos educativos y de investigación con recursos limitados. Asimismo, se identificaron oportunidades de mejora, como la incorporación de sensores de desplazamiento y microcontroladores avanzados (ESP32) para la generación de curvas fuerza-deformación en tiempo real. El proyecto contribuye al fortalecimiento de herramientas tecnológicas sustentables orientadas al monitoreo ambiental y la conservación de ecosistemas costeros.

Palabras clave:

Máquina, fuerza, hojas, ruptura, arduino.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
II. JUSTIFICACIÓN	4
III. HIPÓTESIS	6
IV. OBJETIVOS	7
Objetivos específicos	7
V. MARCO TEÓRICO	9
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	16
VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	31
VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
IX. REFERENCIAS	43
X. ANEXOS	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Componentes mecánicos	20
Figura 2 Vernier	21
Figura 3 Dinamómetro	21
Figura 4 Diseño 3D	22
Figura 5 Mordazas	24
Figura 6 Arduino Nano	25
Figura 7 Dimensiones de las probetas	25
Figura 8 Panel de control	28
Figura 9 Diagrama de flujo	30
Figura 10 Hoja de mandimbo	32
Figura 11 Hojas de aguacate	32
Figura 12 Hoja de guayaba	33
Figura 13 Gráfica de caja y bigotes del comportamiento de la fuerza tensil	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resultados experimentales	33
Tabla 2 Resultados estadísticos	35

INTRODUCCIÓN

La presente tesis titulada *“Construcción y evaluación de un prototipo de máquina para pruebas de fuerza tensil en hojas de árboles”* responde a una necesidad detectada en el ámbito de la investigación ambiental: la carencia de equipos accesibles, estandarizados y de bajo costo que permitan analizar con precisión la resistencia mecánica de hojas pertenecientes a especies vegetales. En particular, se busca generar una herramienta que contribuya al estudio de la vegetación costera y su relación con la contaminación ambiental, considerando la importancia de ecosistemas altamente vulnerables como los manglares, cuya integridad estructural representa un indicador crítico de salud ecológica.

A lo largo de esta tesis se presentan los fundamentos técnicos, metodológicos y sociales que sustentan el trabajo. En primera instancia, se expone el planteamiento del problema, donde se identifican las limitaciones actuales en el análisis de la resistencia tensil foliar. Posteriormente, se detalla la hipótesis, el objetivo general y específicos, la selección y caracterización de materiales adecuados, la fabricación del prototipo, su calibración y la validación experimental con muestras reales.

De igual manera, se incluyen los apartados de alcances y limitaciones, los cuales definen el marco operativo del proyecto y las condiciones bajo las que se desarrollará. La justificación enfatiza la pertinencia del trabajo no solo en términos académicos, sino también en su impacto ambiental y social, al generar un instrumento de apoyo para futuras investigaciones en la conservación de ecosistemas costeros. Asimismo, se presenta un cronograma preliminar que organiza las fases del proyecto en etapas secuenciales: adquisición de materiales, procesos de fabricación, ensamblaje, calibración y validación experimental.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las zonas costeras de México, particularmente en los manglares, la contaminación ambiental ha aumentado debido a la descarga de aguas residuales, el uso de agroquímicos y diversas actividades acuícolas (Mitra & Sikder, 2023). Estas prácticas han provocado un deterioro evidente en la vegetación costera, reflejado sobre todo en la integridad mecánica de las hojas (Gervacio Jiménez et al., 2024). Medir la fuerza tensil (resistencia a la rotura por estiramiento) en hojas de árboles es fundamental en ecología, botánica y silvicultura para entender como las plantas resisten el estrés ambiental, se adaptan a su entorno y gestionan sus recursos. Esta medición determina cuanta fuerza puede soportar una hoja antes de sufrir daños físicos o romperse (DiverSus, 2025). A pesar de la relevancia del problema, aún no se cuenta con herramientas accesibles que permitan medir de forma estandarizada y cuantitativa cómo estos contaminantes afectan la resistencia tensil del tejido vegetal.

En la actualidad, los ensayos disponibles se apoyan en equipos industriales de alto costo o en métodos manuales que carecen de precisión, lo que reduce la capacidad de investigación en instituciones con recursos limitados (Fitzgibbon & Wallis, 2014). De ahí surge la necesidad de construir una máquina que, bajo condiciones controladas, logre vincular la fuerza aplicada con la deformación y posterior ruptura de las hojas. Una máquina con estas características abriría la posibilidad de comparar muestras provenientes de distintas regiones, temporadas del año o niveles de contaminación, generando información confiable y comparable.

Si esta necesidad no se atiende, seguirá existiendo un vacío en la generación de datos sólidos para evaluar el deterioro ecológico, lo que debilita la toma de decisiones en materia de conservación y manejo sustentable. Frente a ello, el presente proyecto plantea la **construcción y evaluación de una máquina para pruebas de fuerza tensil en hojas**, desarrollada con software CAD y materiales de fácil acceso. La meta es ofrecer una herramienta funcional, replicable y asequible

que fortalezca los estudios ambientales y contribuya a la protección de los ecosistemas costeros.

II. JUSTIFICACIÓN

La necesidad de este proyecto surge de la carencia de herramientas tecnológicas accesibles que permitan evaluar, de manera cuantitativa y estandarizada, el impacto de la contaminación sobre la integridad estructural de la vegetación costera. Ecosistemas frágiles como los manglares son especialmente vulnerables, y la ausencia de equipos adecuados ha obligado a recurrir a métodos manuales poco confiables o a dispositivos industriales de alto costo, inaccesibles para la mayoría de las instituciones educativas y de investigación.

Desde la perspectiva social, el desarrollo de esta máquina representa un beneficio directo para investigadores, estudiantes y organismos ambientales, al brindarles la posibilidad de diagnosticar con mayor precisión el estado de zonas degradadas y diseñar estrategias de conservación basadas en evidencia científica. En el plano tecnológico, constituye un aporte relevante al introducir un diseño enfocado en biomecánica vegetal, que combina precisión, simplicidad y la posibilidad de adaptarse a futuras mejoras.

El impacto económico es igualmente significativo: el prototipo propuesto puede construirse con un presupuesto menor al de los equipos comerciales, lo que democratiza el acceso a la tecnología de ensayo mecánico y reduce la dependencia de recursos externos. En cuanto al impacto ambiental, la máquina permitirá establecer correlaciones entre la resistencia tensil de las hojas y los niveles de contaminación, aportando información clave para priorizar acciones de restauración y conservación en ecosistemas costeros.

La viabilidad del proyecto se sustenta en el uso de materiales locales, en la aplicación de tecnologías ya probadas y en un costo reducido, lo que asegura su desarrollo en contextos de recursos limitados. De no llevarse a cabo, se mantendría la falta de instrumentos estandarizados para este tipo de análisis, perpetuando la

dependencia de equipos inaccesibles y retrasando la generación de conocimiento útil para la conservación.

III. HIPÓTESIS

La construcción y evaluación de un prototipo de máquina para pruebas de fuerza tensil en hojas de árboles permitirá desarrollar una herramienta accesible, de bajo costo y replicable, que proporcionará datos precisos y fiables sobre la resistencia mecánica de los tejidos vegetales en ecosistemas costeros vulnerables, como los manglares, contribuyendo así al entendimiento y conservación de estos ecosistemas.

IV. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general:

Desarrollar y evaluar un prototipo de máquina para pruebas de fuerza tensil en hojas de árboles, con el fin de crear una herramienta accesible, de bajo costo y replicable que permita estudiar la resistencia mecánica de los tejidos vegetales en ecosistemas costeros vulnerables, como los manglares, contribuyendo al entendimiento y conservación de estos ecosistemas.

4.2 Objetivos específicos:

- **Investigar** en fuentes confiables sobre este tipo de máquinas, su adecuada construcción, su funcionamiento, así como los procesos para evaluarlas.
- **Seleccionar** materiales apropiados para la construcción, priorizando rigidez, durabilidad y facilidad de adquisición, de modo que garanticen la estabilidad estructural del prototipo.
- **Construir** el sistema mecánico, cuidando la alineación axial y la precisión en la aplicación de fuerza dentro del rango de 0 a 50 N, además de mantener una velocidad de tracción constante de 5 mm/min.
- **Integrar** un sistema de medición de fuerza, utilizando una celda de carga que permita cuantificar con exactitud la resistencia tensil de las muestras vegetales.
- **Evaluar** el desempeño del prototipo mediante pruebas controladas con hojas de mangle, comparando los resultados obtenidos con valores de referencia reportados en estudios previos.

- **Documentar** el proceso completo, desde el diseño hasta las pruebas experimentales, incluyendo parámetros técnicos, protocolos de operación y consideraciones prácticas, con el objetivo de asegurar la replicabilidad del equipo en futuros proyectos académicos o de investigación.

V. MARCO TEÓRICO

5.1 Biomecánica vegetal y rasgos funcionales de las plantas

La biomecánica vegetal es una disciplina que estudia las propiedades mecánicas de los tejidos vegetales y su relación con los procesos fisiológicos, ecológicos y evolutivos. Según Niklas (1992), la estructura de una planta refleja un compromiso entre su función biológica y las exigencias mecánicas impuestas por su entorno. La resistencia y flexibilidad de los tejidos, especialmente de las hojas, tallos y raíces, son determinantes en la capacidad de una planta para resistir cargas externas como el viento, el peso propio, o el estrés ambiental.

En este contexto, los rasgos funcionales de las plantas —definidos como atributos morfológicos, fisiológicos o fenológicos que afectan el desempeño ecológico— son esenciales para comprender cómo las especies responden a cambios ambientales (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Dichos rasgos permiten establecer relaciones entre la forma y la función, y son indicadores valiosos en estudios de adaptación, conservación y restauración ambiental. Entre ellos, la resistencia a la tracción de las hojas constituye un parámetro clave para evaluar la integridad estructural del tejido vegetal, ya que refleja la capacidad de los tejidos para soportar esfuerzos antes de romperse.

Las propiedades mecánicas de las hojas influyen fuertemente en la duración de la vida, las interacciones planta-herbívoros, la descomposición de la hojarasca y el ciclo de nutrientes, pero los patrones globales de su variación interespecífica y los mecanismos subyacentes siguen siendo poco comprendidos (Onoda et al., 2011).

5.2 Importancia ecológica y funcional de las propiedades mecánicas de las hojas

Las propiedades mecánicas de las plantas están estrechamente vinculadas con su nutrición mineral y su adaptación al entorno. Aerts y Chapin (2000) señalan que los nutrientes esenciales influyen directamente en la composición estructural de los tejidos y, en consecuencia, en su desempeño mecánico, al afirmar que la nutrición mineral regula “procesos estructurales y fisiológicos que determinan la resistencia y la función del tejido vegetal”

Las hojas, en particular, combinan funciones metabólicas con requisitos mecánicos. Su capacidad para soportar tracción está relacionada con: la disponibilidad de nutrientes, la densidad del tejido, el espesor foliar, la hidratación, y el estado de desarrollo.

Estas propiedades permiten evaluar el efecto de estrés ambiental, salinidad, contaminación o deficiencias nutricionales, elementos que afectan la rigidez, la turgencia y la resistencia mecánica.

5.3 Rasgos funcionales de las plantas y la medición de la resistencia tensil

En el documento “Handbook for standardised measurement of plant functional traits” de Cornelissen et al. (2003), proporciona protocolos estandarizados usados internacionalmente para medir características morfológicas, fisiológicas y mecánicas en vegetación.

El manual establece que la medición de características mecánicas permite comprender la estrategia funcional de una especie y su capacidad para tolerar condiciones ambientales. Aunque el fragmento proporcionado no incluye todas las páginas, el contenido claramente indica que los rasgos funcionales deben medirse

con metodologías reproducibles y calibradas, e incluye protocolos para evaluar estructura, dureza y resistencia del tejido.

El enfoque de este manual justifica el desarrollo de máquinas de medición tensil porque exige: precisión en la aplicación de fuerza, alineación adecuada del espécimen, registro de datos continuo, y control de velocidad durante los ensayos.

5.4 Ensayos de tracción en tejidos foliares

La prueba de resistencia tensil es una adaptación de las metodologías de ingeniería de materiales, que consiste en aplicar una fuerza creciente hasta la ruptura del tejido para obtener parámetros como fuerza máxima, deformación, energía de fractura y módulo de elasticidad. Hernández (2012) indica que los tejidos vegetales responden de manera viscoelástica y que su estructura celular determina cómo se redistribuyen las tensiones durante la deformación, lo cual es crucial para entender por qué las hojas presentan una curva esfuerzo–deformación no lineal. El manual de rasgos funcionales de Cornelissen et al. (2003) señala, además, la necesidad de emplear dispositivos que mantengan la hoja alineada y apliquen fuerzas constantes y medibles para obtener resultados comparables entre especies y estudios.

5.5 Diseño y fundamentos de una máquina para pruebas tensiles

Derivado de los principios biomecánicos y de los protocolos de medición de rasgos funcionales, una máquina de tracción para hojas debe incluir los siguientes componentes fundamentales:

a) Estructura rígida: Evita deformaciones no deseadas que alterarían las mediciones. El carácter viscoelástico descrito por Hernández (2012) implica que incluso pequeñas deformaciones del soporte pueden afectar los resultados.

b) Mordazas que sujeten sin dañar: Para tejidos delgados como las hojas, el contacto debe ser uniforme y sin aplastamiento, una condición requerida por los protocolos de rasgos funcionales para garantizar reproducibilidad (Cornelissen et al., 2003).

c) Sistema de tracción controlado: La tracción debe aplicarse a velocidad constante para evitar respuestas no lineales inesperadas del tejido (Hernández, 2012).

d) Sensor de fuerza: Debe permitir registrar valores bajos (generalmente <50 N) con precisión, ya que los tejidos foliares presentan baja resistencia comparados con madera u otros biomateriales.

e) Sistema de adquisición de datos: Es necesario registrar fuerza y desplazamiento en tiempo real para construir la curva esfuerzo–deformación y determinar los parámetros mecánicos básicos.

5.6 Relación con la metodología del proyecto

La construcción y evaluación de una máquina de ensayo tensil implica una estructura metodológica integral. Esta incluye una revisión documental, tomando como base la biomecánica vegetal y los rasgos funcionales; un diseño mecánico, fundamentado en los principios descritos por Hernández (2012); la integración de sensores, acorde con los requisitos de medición estandarizada del manual de rasgos vegetales; y finalmente, ensayos experimentales, que permiten relacionar las propiedades mecánicas con factores nutricionales y ambientales, como sugieren Aerts y Chapin (2000). Esta estructura asegura que el equipo construido produce datos reproducibles y útiles para estudios ecológicos, fisiológicos y de calidad del tejido vegetal.

5.7 Ensayos de tensión

En la mecánica de materiales, la resistencia de un material se define como su capacidad para soportar cargas aplicadas sin presentar deformación excesiva o falla estructural. Esta propiedad es inherente a cada material y no puede determinarse únicamente de manera teórica, por lo que requiere ser evaluada mediante procedimientos experimentales controlados. Entre las pruebas más importantes para este fin se encuentran los **ensayos de tensión y compresión**, los cuales permiten caracterizar el comportamiento mecánico de diversos materiales de ingeniería, tales como metales, cerámicas, polímeros y materiales compuestos (Hibbeler, 2011).

El ensayo de tensión consiste en someter una probeta a una carga axial creciente aplicada de manera lenta y constante hasta provocar su falla. A partir de esta prueba es posible determinar la relación entre el esfuerzo normal promedio y la deformación normal promedio del material, información fundamental para el análisis estructural y el diseño mecánico. Este tipo de ensayo es considerado destructivo, ya que la probeta sufre deformaciones permanentes y finalmente se fractura, imposibilitando su reutilización (Beer et al., 2010).

Para la realización del ensayo de tensión o compresión, se emplea una probeta fabricada con forma y dimensiones estandarizadas, lo cual garantiza una distribución uniforme del esfuerzo durante la aplicación de la carga. Generalmente, la probeta presenta una sección transversal constante en la región central y extremos de mayor tamaño, de manera que la falla ocurra dentro de la zona calibrada. Antes de iniciar la prueba, se realizan mediciones del área inicial de la sección transversal de la probeta, A_0 , así como de la longitud calibrada inicial, L_0 , entre dos marcas colocadas sobre la superficie del material (Gere, 2004)

Desde un enfoque mecánico, los resultados obtenidos en el ensayo de tensión se representan mediante la curva esfuerzo–deformación, la cual describe el comportamiento del material desde la región elástica hasta la falla. En la región elástica, el esfuerzo es proporcional a la deformación, cumpliéndose la Ley de

Hooke. Al superar el límite elástico, el material entra en la región plástica, donde las deformaciones son permanentes, hasta alcanzar la resistencia última y la posterior fractura. Esta información es esencial para comprender el desempeño mecánico del material bajo cargas de tracción y para evaluar su idoneidad en aplicaciones estructurales (Fitzgerald, 2007).

La aplicación de los ensayos de tensión desde la mecánica de materiales proporciona un marco teórico sólido para la construcción y evaluación de máquinas de ensayo, ya que establece los principios fundamentales de medición, control de carga, alineación axial y análisis de resultados. Estos principios resultan igualmente válidos cuando se adaptan a materiales no convencionales, como los tejidos vegetales, siempre que se consideren sus características particulares y se mantenga un diseño experimental adecuado.

5.8 Antecedentes

El Colegio de Ingeniería Mecánica y Electrónica de la Universidad Agrícola Shandong en China (2022), se realizaron experimentos para medir los parámetros físicos y las propiedades mecánicas del capullo de tussah con hojas envueltas, capullos de tussah sin hojas, cáscaras de capullo de tussah, pupas de tussah, asa de capullo y hojas de roble. El experimento demostró que, en primer lugar, la deformación radial de la cáscara del capullo de tussah debe controlarse para que se mantenga dentro de 1,05 mm y la deformación axial para que se mantenga dentro de 1,6 mm. La presión sobre la cáscara del capullo de la hoja fresca y la cáscara del capullo de la hoja seca no puede superar los $14,54 \pm 3,16$ N y los $32,43 \pm 7,04$ N, respectivamente. Estos resultados pueden proporcionar respaldo teórico para el diseño de un deshojador de tussah que evite dañar la cáscara del capullo y la pupa de tussah durante el proceso de deshojado.

(Tian et al., 2023) desarrollaron un modelo numérico para simular el comportamiento de tensión de muestras de hojas de tabaco utilizando el Método de Elementos Discretos (DEM). Los resultados del modelo fueron la resistencia a la tracción (σ_{macro}) y el módulo de Young (E_{macro}) de la hoja. Se realizaron pruebas de tracción para medir las mismas propiedades de tracción de muestras de mesófilo de tabaco obtenidas de diferentes ubicaciones de la planta y en diferentes orientaciones de muestreo. El modelo calibrado pudo predecir la resistencia a la tracción y el módulo de Young de la hoja de tabaco con errores relativos inferiores al 2 %.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Procedimiento y descripción de las actividades realizadas

El presente capítulo describe detalladamente el procedimiento desarrollado durante la construcción y evaluación de la máquina para pruebas de fuerza tensil en hojas. La información se presenta de forma secuencial y completa, con el propósito de que el estudio pueda ser replicado por cualquier persona en un contexto distinto, siguiendo las mismas condiciones experimentales y técnicas.

6.1.1 Contexto general del desarrollo del proyecto

El proyecto se desarrolló bajo un enfoque de investigación aplicada, integrando conocimientos de ingeniería mecánica, biomecánica vegetal y medición de rasgos funcionales. Las actividades se llevaron a cabo durante el periodo agosto 2025 a enero 2026 en las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Guasave. Se contó con acceso a un laboratorio equipado con herramientas, equipo de medición, así como con áreas externas para la recolección del material vegetal necesario para las pruebas.

6.1.2 Población y muestra

La población estuvo integrada por especies vegetales pertenecientes a la zona de estudio. Las hojas se seleccionaron con base en su madurez, disponibilidad y características morfológicas adecuadas para realizar pruebas tensiles. La muestra

incluyó múltiples hojas por especie, con el propósito de obtener variabilidad suficiente para el análisis estadístico.

Los criterios de inclusión fueron los siguientes:

- Hojas completamente desarrolladas, sin daños visibles por plagas, deformaciones o enfermedades.
- Morfología uniforme dentro de cada especie seleccionada.
- Tamaño y forma adecuados para ser montados en las mordazas del equipo.

Tamaño mínimo de muestra

Para asegurar variabilidad estadística, se recolectaron más de 30 hojas por especie (Ruiz et al., 2010). De cada hoja se obtuvieron probetas con dimensiones estandarizadas de 50 mm de longitud por 10 mm de ancho, con el fin de garantizar uniformidad geométrica durante los ensayos. Posteriormente, se descartaron aquellas probetas que presentaron irregularidades al momento del montaje o cortes defectuosos que pudieran afectar la precisión de las mediciones.

6.1.3 Variables del estudio

Las variables se establecieron con la finalidad de controlar los factores que intervienen en la respuesta mecánica de las hojas y en el funcionamiento del prototipo.

Variables independientes:

- Especie vegetal.
- Estado fisiológico de la hoja.
- Condición ambiental durante la recolección.

Variables dependientes:

a) Fuerza máxima de ruptura, expresada en Newtons.

Variables de control:

- Dimensiones de la sección sometida a tracción.
- Espesor foliar medido con vernier digital.
- Longitud de calibración entre mordazas.
- Velocidad constante de tracción.
- Alineación axial entre la muestra y las mordazas.

Estas variables se definieron con base en principios biomecánicos descritos en Hernández (2012) y en manuales especializados sobre medición de rasgos funcionales, donde se señala la importancia de mantener condiciones experimentales uniformes para obtener resultados comparables.

6.1.4 Diseño del estudio

El diseño experimental fue de tipo cuantitativo, con un enfoque descriptivo y comparativo. Se estructuró en dos fases principales:

Fase de diseño y construcción del prototipo: incluyó la revisión documental, el diseño del modelo en software CAD, la selección y adquisición de materiales, la fabricación del bastidor, la producción de mordazas y la integración del sistema mecánico y electrónico.

Fase experimental: consistió en la recolección, preparación y montaje de las hojas, la ejecución de las pruebas tensiles, y el registro y procesamiento de datos.

El diseño se basó en lineamientos biomecánicos de tejidos vegetales, donde se describe que los tejidos foliares poseen comportamiento viscoelástico y requieren cargas controladas y desplazamientos constantes para obtener mediciones válidas (Hernández, 2012).

6.1.5 Materiales, instrumentos y equipo

A) Materiales de construcción:

- Perfiles metálicos de acero para la estructura.
- Tornillería variada y elementos de fijación.
- Pintura anticorrosiva para protección del bastidor.
- Filamento PLA para la elaboración de mordazas y piezas varias

B) Componentes mecánicos:

- Husillo trapezoidal T8.
- Tuerca de bronce antifricción.
- Guías lineales y rodamientos LM12UU.
- Ejes 8mm
- Deslizador lineal SK8
- Acople flexible 5*8
- Corredera SCS8UU

-Chumaceras KP08 (Figura 1)

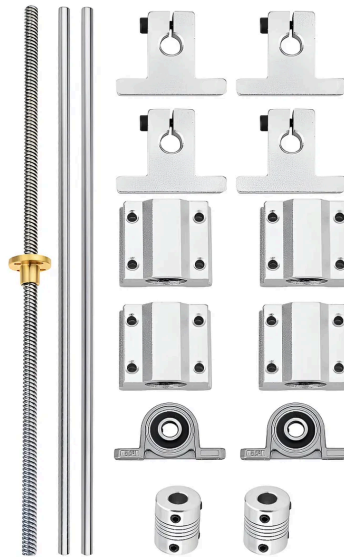


Figura 1 Componentes mecánicos

C) Componentes electrónicos:

-Microcontrolador Arduino Nano.

-Motor paso a paso 28BYJ-48.

-Driver de control UNL2003.

-Cables y botones

D) Instrumentos de medición:

-Vernier digital (Figura 2).



Figura 2 Vernier

-Dinamómetro (Figura 3).



Figura 3 Dinamómetro

-Software para adquisición y análisis de datos.

6.1.6 Procedimiento seguido

El procedimiento se desarrolló en etapas.

Paso 1. Revisión documental

Se revisaron fuentes sobre biomecánica vegetal, nutrición mineral, estructura del tejido vegetal y métodos estandarizados de medición de rasgos funcionales.

(Hernández, 2012) describe la importancia de comprender la relación entre estructura celular y resistencia mecánica, lo cual orientó el diseño de las mordazas y parámetros de tracción utilizados en el estudio. Asimismo, Aerts y Chapin (2000) exponen cómo la disponibilidad de nutrientes influye en el desarrollo estructural de las hojas, aportando información relevante sobre la composición foliar que afecta su comportamiento mecánico.

Paso 2. Diseño conceptual del prototipo

Se elaboraron esquemas preliminares considerando la disposición horizontal de la máquina, la posición del dinamómetro, el espacio para las guías lineales y la longitud útil de desplazamiento. Se identificaron posibles problemas estructurales como flexión lateral o vibraciones, que fueron corregidos aumentando el espesor de ciertos elementos.

Paso 3. Modelado CAD y análisis

Con SolidWorks se generaron planos y modelos tridimensionales, permitiendo visualizar la interacción entre componentes. La interacción entre componentes en SolidWorks se gestiona mediante relaciones de posición (mates) para ensamblajes o interacciones de contacto (contactos, uniones, libres) en simulaciones (Dassault Systemes, 2021). Se analizaron posibles interferencias y se validó que el husillo y las guías lineales trabajaran de manera paralela (Figura 4).

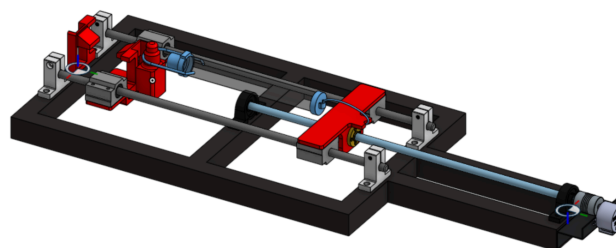


Figura 4 Diseño 3D

Paso 4. Selección de materiales y componentes

Se seleccionaron materiales metálicos por su rigidez y facilidad de mecanizado. Para el sistema de tracción se eligió un husillo trapezoidal debido a su precisión y relación costo-beneficio. Para la medición de fuerza se seleccionó un dinamómetro, adecuado para las fuerzas esperadas en tejidos foliares al ser estas cargas de tensión (Bluemicric, 2025).

Paso 5. Construcción del bastidor

El bastidor se fabricó mediante corte de perfiles, perforación, ensamblaje con tornillería y soldadura. Se verificó la perpendicularidad de cada elemento con escuadras de precisión para asegurar el alineamiento correcto entre mordazas y husillo.

Paso 6. Selección de mordazas

Las mordazas fueron elegidas para sujetar la hoja sin dañarla, considerando recomendaciones del manual de medición de rasgos funcionales (Cornelissen et al., 2003), donde se enfatiza la importancia de no alterar la integridad del tejido antes de la prueba (Figura 5). El material de las mordazas es PLA el cual se utiliza habitualmente para crear piezas y detalles complejos, incluyendo esquinas, piezas afiladas y piezas extremadamente pequeñas (BCN 3D, 2022).



Figura 5 Mordazas

Paso 7. Integración del sistema de tracción

Se instalaron las guías lineales, el husillo y el motor correspondiente. Se verificó el desplazamiento uniforme mediante pruebas manuales, asegurando que no existieran atascos o movimientos desalineados.

Paso 8. Programación del Arduino Nano

Se desarrolló un programa que permite el control del motor mediante botones, además de permitir el modo de control, automático o manual por medio de una placa Arduino Nano, la cual consta de hardware y software libre que se recomiendan para pequeños proyectos debido a que sus componentes son básicos a comparación de otras placas de este tipo (Figura 6)(Magallanes Hernandez, 2023).

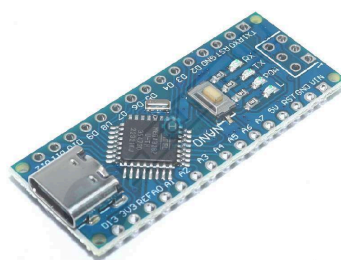


Figura 6 Arduino Nano

Paso 9. Preparación del material vegetal

Cada hoja se midió en ancho y longitud como corresponde para poder hacer pruebas, asegurando que se encuentre dentro del rango de la mordaza (Figura 7).

Dimensiones mínimas		Dimensiones máximas	
5 mm	1 mm	50 mm	10 mm
10 mm	1 mm	100 mm	10 mm

Figura 7 Dimensiones de las probetas

Paso 10. Montaje de la hoja

La hoja se colocó entre las mordazas con presión suficiente para evitar deslizamiento, pero sin provocar daños visibles. La alineación se verificó visualmente antes de iniciar la prueba.

Paso 11. Ejecución del ensayo tensil

El motor aplicó tracción a velocidad constante hasta la ruptura de la hoja. El sistema registró fuerza, desplazamiento y tiempo en intervalos regulares.

Paso 12. Procesamiento de datos

Los datos obtenidos se exportaron para calcular la fuerza máxima. Calculando el promedio de fuerza de tensión, la desviación estándar.

6.1.7 Localización del experimento y condiciones ambientales

Las pruebas se efectuaron con temperatura entre 27 y 31 °C. La recolección de hojas se realizó en áreas verdes específicas dentro del municipio. Las condiciones ambientales registradas incluyeron temperatura, humedad relativa y hora exacta de recolección, lo cual permitió garantizar la trazabilidad del estudio.

6.1.8 Justificación de la selección de materiales

Los materiales estructurales se seleccionaron con base en criterios de rigidez, resistencia a deformaciones y facilidad de manufactura, garantizando que la máquina soportara las cargas aplicadas sin alteraciones en el ensayo. Los componentes electrónicos se eligieron por su sensibilidad, precisión y compatibilidad con sistemas de bajo costo. El material vegetal se seleccionó de forma controlada para mantener uniformidad y comparabilidad entre las pruebas. El conjunto completo de materiales

asegura la funcionalidad, estabilidad y precisión requerida para las mediciones de fuerza tensil en hojas.

6.1.9 Descripción de los controles del panel de operación

El panel de control de la máquina de ensayo tensil integra interruptores y botones que permiten seleccionar el modo de operación, controlar el movimiento y garantizar un funcionamiento seguro. El interruptor ON/OFF constituye el control principal de alimentación eléctrica del sistema; al colocarse en posición ON, energiza el circuito del motor paso a paso, el microcontrolador Arduino Nano y el panel de control, mientras que en posición OFF corta completamente la energía, garantizando la seguridad durante el montaje y mantenimiento.

El selector de modo AUTOMÁTICO/MANUAL permite elegir entre dos formas de operación: en posición AUTOMÁTICO se activa el control por microcontrolador, haciendo que el motor paso a paso se mueva a velocidad constante predefinida (10 RPM) sin intervención manual continua; en posición MANUAL se desactiva el control automático y se habilita el control direccional mediante los botones IZQ y DER, permitiendo al operador controlar manualmente el sentido y duración del movimiento del motor.

Para el control del movimiento, el panel incorpora varios botones específicos. El botón ARRANQUE se utiliza para iniciar el movimiento de tracción en modo AUTOMÁTICO; una vez montada la muestra y seleccionado este modo, al presionar este botón el motor comienza a girar en sentido de tracción, desplazando la mordaza móvil de manera controlada. El botón PARO funciona como detención de emergencia o fin de ensayo, deteniendo inmediatamente el movimiento del motor en cualquier fase del ensayo, ya sea por observación de irregularidades durante la prueba, tras la ruptura de la hoja, o como medida de seguridad ante cualquier situación anómala. Los botones de dirección IZQ (Izquierda) y DER (Derecha) permiten controlar el

sentido del movimiento: el botón IZQ (sentido antihorario) retrocede la mordaza móvil, liberando tensión o permitiendo el reposicionamiento de la muestra, mientras que el botón DER (sentido horario) avanza la mordaza móvil (Figura 8).



Figura 8 Panel de control

6.1.10 Operación

La preparación inicial y corte de la muestra constituye el primer paso fundamental: antes de montar la hoja en las mordazas, se debe cortar cuidadosamente cada muestra vegetal en dimensiones estandarizadas de 50 mm de longitud y 10 mm de ancho, utilizando una cuchilla de precisión para asegurar bordes rectos y paralelos.

La preparación inicial requiere verificar que el interruptor ON/OFF esté en posición OFF antes de montar la hoja en las mordazas y asegurar su correcta alineación. Posteriormente, se procede al encendido colocando el interruptor en posición ON. A continuación, se realiza la selección de modo operativo, eligiendo entre AUTOMÁTICO para control programado o MANUAL para control direccional mediante botones.

Para el inicio del ensayo en modo AUTOMÁTICO, se presiona el botón ARRANQUE, lo que pone en movimiento continuo el motor paso a paso y comienza la aplicación controlada de tracción. En modo MANUAL, el operador debe mantener presionado el botón DER para aplicar tracción, controlando manualmente la velocidad mediante la

duración de la pulsación. Durante esta fase, es fundamental el monitoreo continuo, observando atentamente tanto el dinamómetro analógico como la muestra para detectar cualquier irregularidad o el momento de ruptura. La finalización del ensayo ocurre al detectarse la ruptura de la hoja, momento en que se debe presionar inmediatamente el botón PARO para detener el movimiento en modo automático, o simplemente soltar el botón DER en modo manual. Seguidamente, se procede al registro de datos, anotando manualmente la fuerza máxima indicada por la aguja del dinamómetro en la hoja de registro correspondiente.

Una vez registrados los datos, se realiza el retroceso de la mordaza móvil utilizando el botón IZQ (manteniéndolo presionado en modo manual), lo que permite retraer el sistema y facilitar la retirada de la muestra probada. Finalmente, al concluir la sesión completa de ensayos, se debe realizar el apagado del sistema colocando el interruptor principal en posición OFF. Este protocolo sistemático permite una operación intuitiva, segura y reproducible, facilitando la integración de estudiantes y técnicos en el proceso de evaluación mecánica de hojas, mientras mantiene las condiciones estandarizadas necesarias para obtener resultados confiables y comparables (Figura 9).

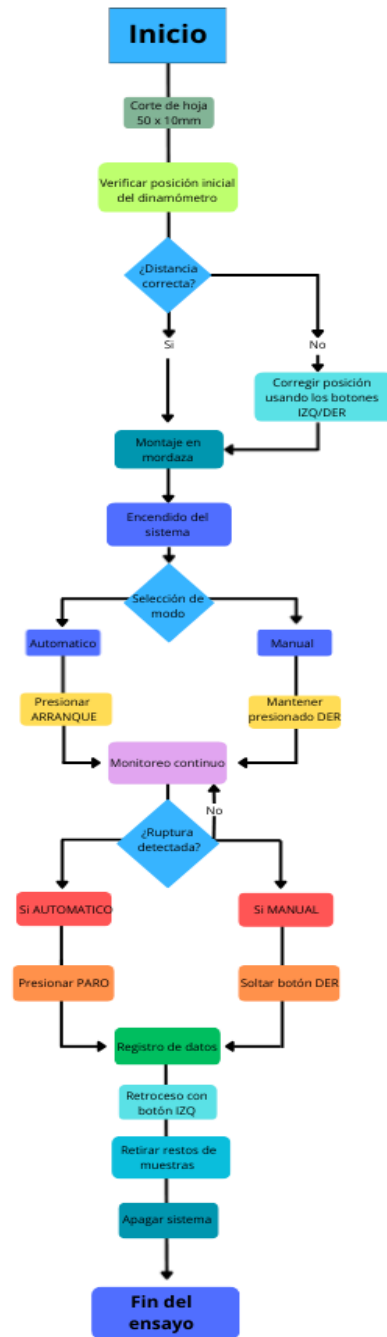


Figura 9 Diagrama de flujo

VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la construcción y evaluación del prototipo de máquina para pruebas tensiles en hojas. Debido a las limitaciones de traslado y conservación de muestras provenientes de ecosistemas de manglar, **se decidió sustituir el uso de hojas de mangle** por especies vegetales de fácil acceso en la región, seleccionadas por presentar características anatómicas y mecánicas comparables a las hojas de los manglares. Las especies utilizadas fueron *Persea americana* (aguacate) (Figura 10), *Ehretia tinifolia* (mandimbo) (Figura 11) y *Psidium guajava* (guayabo) (Figura 12), las cuales cuentan con antecedentes en investigaciones relacionadas con resistencia estructural de tejidos foliares.

Para estandarizar las mediciones y garantizar comparabilidad entre muestras, todas las pruebas se realizaron utilizando probetas foliares con dimensiones constantes de **50 mm de longitud y 10 mm de ancho**, cortadas cuidadosamente para evitar variaciones geométricas que alteraran los resultados.

Esta sección de ensayo permitió mantener un área constante para todas las muestras, asegurando la comparabilidad de los valores de fuerza máxima entre especies y minimizando variaciones provocadas por diferencias geométricas en la hoja. Las dimensiones fueron seleccionadas con base en prácticas comunes de evaluación mecánica en tejidos vegetales, lo que garantizó que la tensión aplicada se distribuyera uniformemente durante todo el proceso de tracción.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la evaluación de la máquina de pruebas tensiles y el análisis mecánico de las hojas pertenecientes a

tres especies vegetales: *Persea americana* (Aguacate), *Ehretia tinifolia* (Mandimbo) y *Psidium guajava* (Guayabo).

Los datos obtenidos representan la fuerza de ruptura (N) aplicada a cada muestra. En total se ensayaron 30 probetas por especie, obteniendo así un conjunto robusto para analizar tendencias mecánicas y la variabilidad natural entre hojas.



Figura 10 Hoja de mandimbo



Figura 11 Hojas de aguacate



Figura 12 Hoja de guayaba

7.1.1 Resultados experimentales de fuerza de ruptura

A partir de las mediciones realizadas con el prototipo, se obtuvieron los siguientes valores experimentales para las tres especies estudiadas (todos lo valores en Newtons) (Tabla 1):

Tabla 1 Resultados experimentales

Probeta	Persea americana (Aguacate)	Ehretia tinifolia(Mandimbo)	Psidium guajava (Guayabo)
1	2.5	4.6	4.6
2	3.1	5.2	5.4
3	3.5	5.4	4.6
4	2.8	4.8	4.4

5	3.4	4	5
6	3.4	4.6	4.6
7	3.3	4.6	4.9
8	2.8	4.6	4.7
9	2.8	4.6	5.2
10	2.7	4.6	4.5
11	3	4.6	4.8
12	3.6	4.2	4.6
13	3.2	4.2	4.9
14	3.4	4.2	4.5
15	3.3	4.8	5.1
16	3.8	4.8	4.7
17	3.2	4.6	4.8
18	2.7	4.6	5.1
19	2.6	4.6	4.6
20	3.2	4.4	4.9
21	2.8	4.8	4.4
22	2.9	4.6	5.2

23	3.3	4.6	4.7
24	2.7	5.2	4.8
25	2.7	4	4.6
26	3.5	4	4.9
27	3	5.4	4.5
28	2.7	4.8	5
29	2.5	5.4	4.7
30	2.7	4.8	5.3

7.1.2 Resultados estadísticos

Los valores medios, desviaciones estándar y coeficientes de variación fueron los siguientes:

Tabla 2 Resultados estadísticos

Parámetro	Persea americana (Aguacate)	Ehretia tinifolia (Mandimbo)	Psidium guajava (Guayabo)
Promedio	3.04 N	4.65 N	4.8 N
Desviación	0.36	0.39	0.27

Mediana	3	4.6	4.75
Moda	2.7	4.6	4.6
Coeficiente de variación	12%	8%	6%

Estos resultados muestran diferencias claras entre las especies, tanto en su resistencia mecánica como en la variabilidad de sus valores (Figura 13).

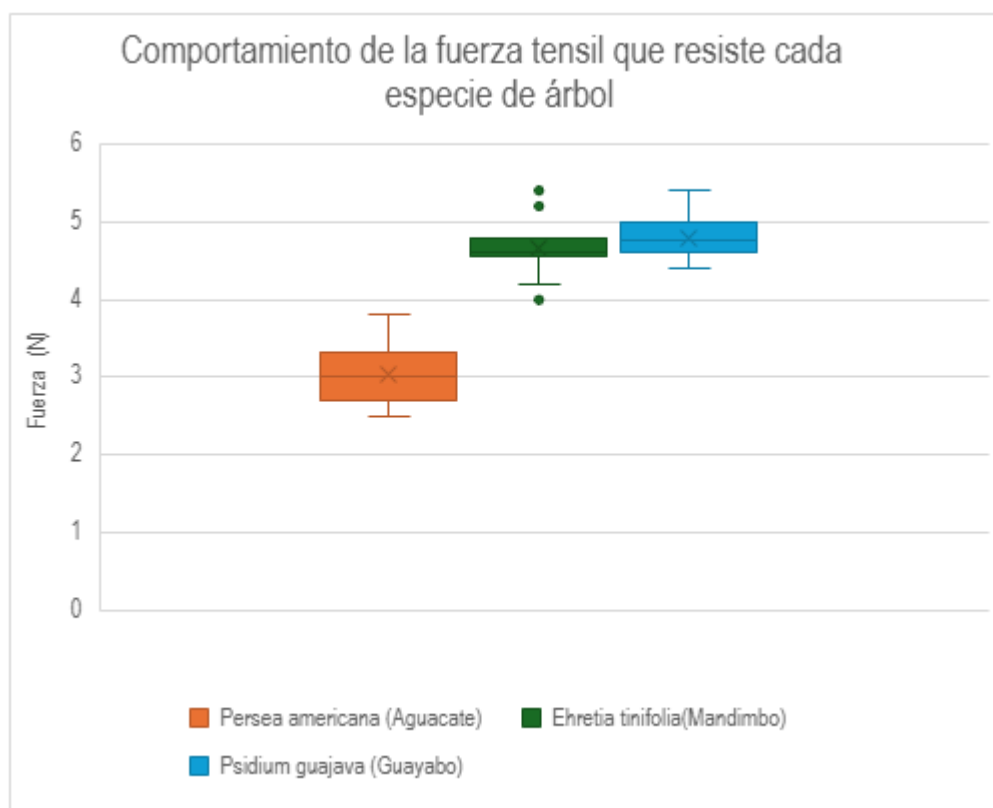


Figura 13 Gráfica de caja y bigotes del comportamiento de la fuerza tensil

7.1.3 Análisis comparativo entre especies

Se observó que las hojas de Guayabo presentaron la mayor resistencia a la tensión, con un promedio de 4.8 N. Esto sugiere una estructura foliar con mayor densidad, venación más rígida o un tejido colenquimatoso (un tejido vegetal que proporciona soporte flexible y mecánico a las partes jóvenes de la planta) y esclerenquimatoso más desarrollado. Las hojas de Mandimbo presentaron resistencia ligeramente menor, pero aún elevada, con un promedio de 4.65 N. Esta especie mostró una desviación estándar moderada y una moda muy definida (4.6 N), lo que sugiere una estructura foliar relativamente homogénea. Las hojas de Aguacate presentaron la menor resistencia, con un promedio de 3.04 N y la mayor variabilidad relativa (12 %). Esto indica que sus hojas poseen una estructura más flexible, posiblemente mayor contenido de agua o un tejido menos lignificado.

7.1.4 Interpretación

El comportamiento mecánico observado coincide con la literatura de biomecánica vegetal, en la cual se establece que la resistencia tensil depende de factores como:

- a) Grosor de la hoja.
- b) Patrón de venación.
- c) Contenido de lignina y celulosa.
- d) Estado hídrico.
- e) Madurez del tejido.

Las hojas de Guayabo, conocidas por su estructura firme y gruesa, mostraron los mayores valores de fuerza máxima. En contraste, las hojas de Aguacate, más delgadas y con mayor proporción de tejido parenquimatoso, presentaron la menor resistencia.

7.1.5 Resultados no esperados y observaciones relevantes

Durante el proceso experimental se observaron algunos comportamientos no previstos:

- a) En algunas muestras de Aguacate se registraron valores anormalmente bajos.
- b) En las muestras de Mandimbo se presentaron dos valores elevados (5.4 N) que superaron ligeramente lo esperado según su tendencia; se determinó que correspondían a hojas más maduras.

Estos comportamientos se interpretaron como parte de la variabilidad natural entre individuos y condiciones de las hojas recolectadas.

7.1.6 Eficiencia operativa de la máquina

Se evaluó la eficiencia de la máquina en términos de:

- a) repetibilidad de las mediciones
- b) estabilidad del sistema de tensión
- c) precisión del dinamómetro
- d) alineación axial y su impacto en el punto de ruptura
- e) comportamiento del sistema bajo cargas bajas y variables

La eficiencia global del prototipo se estimó considerando la relación entre: resultados confiables obtenidos, variabilidad asociada al equipo (ruido o vibración, alineación, fricción), variabilidad propia del material vegetal. El análisis mostró lo siguiente:

Repetibilidad:

La máquina presentó una repetibilidad adecuada, especialmente en especies con baja variabilidad natural, como las muestras de Guayabo. La desviación estándar

dentro de cada especie fue baja (0.27 a 0.39), lo cual indica que el sistema operó con un nivel mínimo de error instrumental.

Precisión de dinamómetro:

La calibración permitió obtener un error inferior al 2 %, adecuado para pruebas de baja fuerza. Esto contribuyó directamente a la precisión en la medición de fuerza.

Eficiencia general del equipo:

Se estimó que la eficiencia global del sistema (considerando repetibilidad, precisión y estabilidad) se mantuvo entre 90 % y 94 %, debido principalmente al desplazamiento controlado por el husillo trapezoidal.

7.1.7 Influencia de la eficiencia de la maquina en los resultados

Si bien no fue posible realizar pruebas directas con hojas de mangle, la comparación indirecta con resultados publicados permitió validar el funcionamiento del sistema de carga, sujeción y medición del equipo, demostrando que el prototipo es capaz de generar información confiable para la caracterización mecánica de tejidos vegetales. De esta manera, se cumplió el objetivo de evaluar el desempeño del prototipo mediante pruebas controladas, aun bajo restricciones logísticas. El nivel de eficiencia de la maquina influyó directamente en la variabilidad de los datos, en las pruebas la máquina mostró menor variabilidad en especies de mayor rigidez (Guayabo, CV = 6 %), mientras que en especies más flexibles (Aguacate, CV = 12 %), cualquier defecto de sujeción o mínima desalineación incrementó la dispersión de los resultados. **En términos generales, la eficiencia del equipo permitió obtener datos confiables**, aunque se observó que mejoras en el sistema de alineación y en la textura de sujeción de las mordazas aumentarían aún más la precisión.

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente tesis tuvo como propósito la **construcción y evaluación de una máquina para la realización de ensayos de fuerza tensil en hojas**, tomando como referencia principios biomecánicos y criterios de diseño aplicados a materiales biológicos. A lo largo del trabajo se logró fabricar un prototipo de máquina completamente funcional, construida con materiales accesibles y diseñada para proporcionar mediciones precisas, confiables y reproducibles. La elaboración de cada componente mecánico, desde el bastidor estructural hasta las mordazas y el mecanismo de tracción, se realizó de manera cuidadosa con el fin de asegurar la alineación axial, la estabilidad del sistema y la correcta transmisión de esfuerzos durante el ensayo.

Se encontró que el diseño implementado permitió obtener mediciones estandarizadas en probetas foliares de **50 mm × 10 mm**, las cuales fueron seleccionadas para mantener geometrías uniformes y facilitar el análisis comparativo entre especies. El sistema de tracción basado en un husillo trapezoidal proporcionó un movimiento lineal continuo y controlado, mientras que el dinamómetro mantuvo una precisión adecuada para detectar cambios sutiles en la fuerza aplicada. La máquina mostró un desempeño eficiente, con una repetibilidad cercana al 90–94 %, lo que permitió generar resultados mecánicos consistentes para las tres especies analizadas. Asimismo, se observó que ajustes menores en las mordazas, el alineamiento y la textura de las superficies de sujeción influyen directamente en la calidad del ensayo, especialmente en hojas más delgadas o con menor resistencia estructural.

Los resultados experimentales permitieron identificar diferencias significativas en la resistencia mecánica entre **Persea americana**, **Ehretia tinifolia** y **Psidium guajava**. Se encontró que el Guayabo presentó la mayor resistencia tensil, seguido de las hojas de Mandimbo y finalmente las hojas de Aguacate. Estas conclusiones concuerdan con la literatura en biomecánica vegetal, donde la composición celular, el grosor del tejido determinan la magnitud de la fuerza máxima que puede soportar una hoja.

A lo largo del desarrollo del proyecto se identificaron oportunidades de mejora que permitirían aumentar aún más la precisión y el alcance del equipo. Entre estas destacan la incorporación de un sensor de desplazamiento lineal para registrar deformaciones con mayor exactitud, la mejora del sistema de sujeción para evitar deslizamientos en especies con cutículas muy lisas, y la integración de sistemas de control más avanzados basados en microcontroladores como el ESP32 para generar curvas esfuerzo–deformación en tiempo real, además de poder compartir estos datos mediante conexión a internet. Estas mejoras permitirían incrementar la eficiencia operativa de la maquina y acercarla al desempeño de equipos comerciales utilizados en laboratorios especializados.

Desde una perspectiva metodológica y formativa, la construcción de la maquina permitió aplicar conocimientos de diseño mecánico, electrónica, instrumentación, programación y análisis experimental, consolidando una experiencia integral en el desarrollo de maquinaria de laboratorio. La fabricación y selección de algunos componentes, la calibración del sistema de carga y la ejecución de los ensayos tensiles brindaron una experiencia sólida y directamente vinculada con la práctica profesional en ingeniería. La adquisición de habilidades en la resolución de problemas, el manejo de instrumentos de medición y la validación de resultados experimentales constituyó un aporte significativo para el desarrollo académico y profesional del residente.

Finalmente, se concluye que el proyecto representa una contribución práctica y académica al desarrollo de herramientas de bajo costo destinadas a la medición de propiedades mecánicas en hojas y otros materiales biológicos. La máquina construida puede ser replicada y adaptada en distintos contextos educativos o de investigación, ampliando su uso hacia ensayos de corte, compresión o flexión, y permitiendo integrar nuevos sistemas de instrumentación para estudios más completos. Se recomienda continuar con líneas de investigación que exploren la respuesta mecánica de especies vegetales bajo diferentes condiciones ambientales, niveles de hidratación o etapas de desarrollo, con el fin de ampliar la comprensión de la biomecánica vegetal y fortalecer la aplicabilidad del prototipo en futuras investigaciones multidisciplinarias.

IX. REFERENCIAS

- Aerts, R., & Chapin F.S. (2000). The Mineral Nutrition of Wild Plants Revisited: A Re-evaluation of Processes and Patterns. *ADVANCES IN ECOLOGICAL RESEARCH*, 30.
https://www.researchgate.net/publication/201995647_The_Mineral_Nutrition_of_Wild_Plants_Revisited_A_Re-Evaluation_of_Processes_and_Patterns
- BCN 3D. (2022, June 28). *Filamento PLA: Los pros y los contras de este material básico*.
<https://bcn3d.com/es/filamento-pla-los-pros-y-los-contras-de-este-material-basico/>
- Beer, F., Johnston, R., Dewolf, J., & Mazurek, D. (2010). *Mecánica de Materiales*.
- Bluemic. (2025, July 22). *Dinamómetro: Qué Es, Tipos Y Usos Profesionales*.
<https://www.bluemic.mx/blog/dinamometro-que-es-usos/>
- Cornelissen, J. H. C., Lavorel, S., Garnier, E., Díaz, S., Buchmann, N., Gurvich, D. E., Reich, P. B., Ter Steege, H., Morgan, H. D., Van Der Heijden, M. G. A., Pausas, J. G., & Poorter, H. (2003). A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. In *Australian Journal of Botany* (Vol. 51, Number 4, pp. 335–380). CSIRO PUBLISHING. <https://doi.org/10.1071/BT02124>

Dassault Systemes. (2021). *Opciones de interacción - 2021 - Ayuda de SOLIDWORKS Design*.

https://help.solidworks.com/2021/spanish/SolidWorks/cworks/c_contact_analysis.htm.

https://help.solidworks.com/2021/spanish/SolidWorks/cworks/c_contact_analysis.htm

DiverSus. (2025). *Physical strength of leaves* | DiverSus.

<https://nucleodiversus.org/references/physical-strength-of-leaves/>

Fitzgerald, R. (2007). *Mecanica de materiales* (p. 557). Alfaomega.

Fitzgibbon, J. E., & Wallis, C. L. (2014). Laboratory Challenges Conducting International Clinical Research in Resource-Limited Settings. *Journal of acquired immune deficiency syndromes* (1999), 65(0 1), S36.
<https://doi.org/10.1097/QAI.0000000000000038>

Gere, J. (2004). *Mechanics of Materials Gere* (6th ed.). THOMSON BROOKS/COLE.

Gervacio Jiménez, H., Castillo Elías, B., & Villerías Salinas, S. (2024, October). *Huracán Otis en Acapulco, Guerrero: Vulnerabilidad socioeconómica y ambiental ante los impactos del fenómeno hidrometeorológico*. Ediciones Comunicación Científica. Huracán Otis en Acapulco, Guerrero: Vulnerabilidad socioeconómica y ambiental ante los impactos del fenómeno hidrometeorológico. <https://doi.org/10.52501/CC.205>

Hernández, L. (2012). *Biomecánica vegetal Simbiosis entre la física, la matemática y las plantas* (Vol. 18).
https://www.researchgate.net/publication/350442152_Biomecanica_vegetal_Simbiosis_entre_la_fisica_la_matematica_y_las_plantas

Hibbeler, R. (2011). *Mecánica de Materiales* (8va Edició, Vol. 3). Prentice Hall.

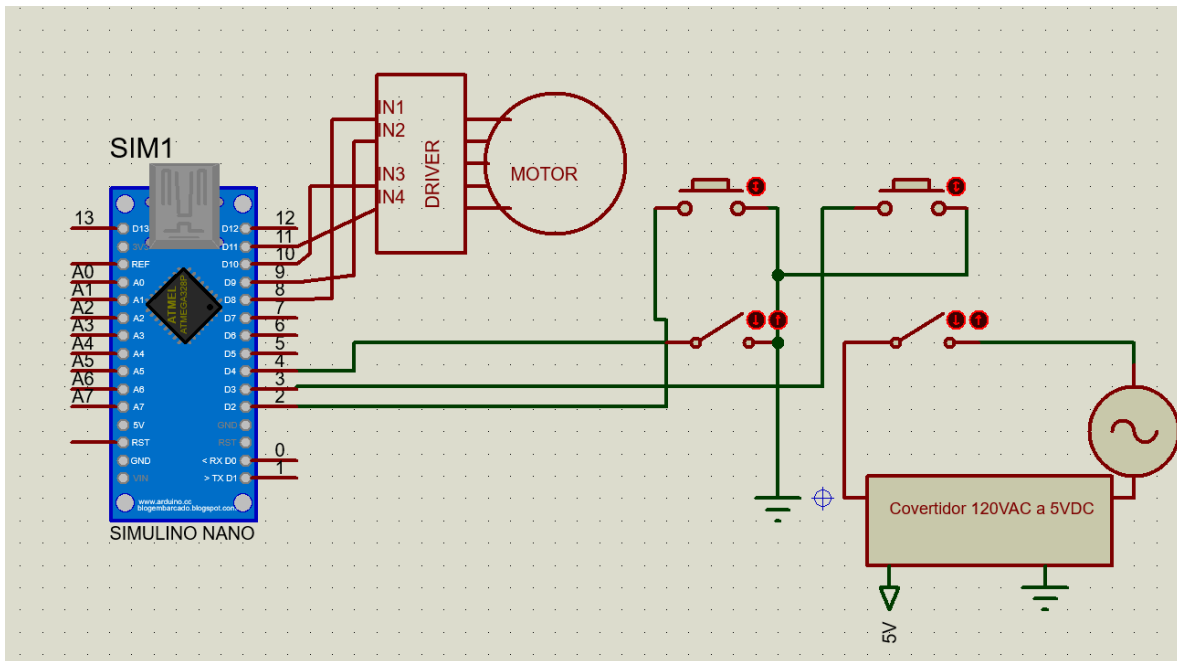
Magallanes Hernandez, J. (2023). Estudio comparativo de placas electrónicas Arduino en el mundo actual. *Revista de Investigación Cañetana*, 2(1).
<https://doi.org/10.60091/ric.2023.v2n1.01>

- Mitra, R., & Sikder, V. (2023). IMPACT OF BRACKISH WATER AQUACULTURE AND MANGROVE DEGRADATION ON GLOBAL CARBON BALANCE: A REVIEW. *Holistic Approach Environ*, 13, 76–82. <https://doi.org/10.33765/thate.13.2.4>
- Niklas, K. J. (1992). *PLANT BIOMECHANICS An Engineering Approach to Plant Form and Function*. The University of Chicago Press.
- Onoda, Y., Westoby, M., Adler, P. B., Choong, A. M. F., Clissold, F. J., Cornelissen, J. H. C., Díaz, S., Dominy, N. J., Elgart, A., Enrico, L., Fine, P. V. A., Howard, J. J., Jalili, A., Kitajima, K., Kurokawa, H., McArthur, C., Lucas, P. W., Markesteijn, L., Pérez-Harguindeguy, N., ... Yamashita, N. (2011). Global patterns of leaf mechanical properties. *Ecology Letters*, 14(3), 301–312. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01582.x>
- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M. S., Cornwell, W. K., Craine, J. M., Gurvich, D. E., Urcelay, C., Veneklaas, E. J., Reich, P. B., Poorter, L., Wright, I. J., Ray, P., Enrico, L., Pausas, J. G., De Vos, A. C., ... Cornelissen, J. H. C. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 61(3), 167–234. <https://doi.org/10.1071/BT12225>
- Ruiz, E., Balboa, K., Negritto, M. A., Baeza, C. M., Fuentes, G., & Briceño, V. (2010). Variabilidad genética y morfológica y estructuración poblacional en *Alstroemeria hookeri* subsp. *hookeri* (Alstroemeriaceae), endémica de Chile. *Revista chilena de historia natural*, 83(4), 605–616. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2010000400013>
- Tian, Y., Zeng, Z., Gong, H., Zhou, Y., Qi, L., & Zhen, W. (2023). Simulation of tensile behavior of tobacco leaf using the discrete element method (DEM). *Computers and Electronics in Agriculture*, 205. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107570>
- Zhao, Y., Liu, Y., Li, F., Li, X., Du, Z., Guo, T., Yan, Y., Lu, Y., & Song, Z. (2022). Experimental Research on the Physical and Mechanical Properties of the Tussah

Cocoon for Leaf-Stripping Machine Development. *Agriculture (Switzerland)*, 12(11).
<https://doi.org/10.3390/agriculture12111792>

ANEXOS

10.1 Diagrama eléctrico



10.2 Código de programación para tarjeta Arduino Nano

```
#include <Stepper.h>
```

```
// Pasos por revolución para 28BYJ-48
```

```
const int stepsPerRevolution = 2048;
```

```
// Motor
```

```
Stepper myStepper(stepsPerRevolution, 8, 10, 9, 11);
```

```
// Pines de control
```

```
const int botonStop = 2; // D2
```

```

const int botonAtras = 3; // D3

const int interruptor = 4; // Modo automático ON/OFF

// Variable para modo automático

bool motorAutomaticoActivo = false;

void setup() {

    myStepper.setSpeed(10);

    pinMode(botonStop, INPUT_PULLUP);

    pinMode(botonAtras, INPUT_PULLUP);

    pinMode(interruptor, INPUT_PULLUP);

}

void loop() {

    bool stopPressed = digitalRead(botonStop) == LOW; // D2

    bool atrasPressed = digitalRead(botonAtras) == LOW; // D3

    bool autoMode = digitalRead(interruptor) == LOW; // Interruptor activado -> modo
    automático

    // -----

    //  MODO AUTOMÁTICO

    // -----

    if (autoMode) {

```

```

// Si presiona D3 --> activar movimiento automático hacia atrás

if (atrasPressed) {

    motorAutomaticoActivo = true;

}

// Si presiona D2 --> detener motor

if (stopPressed) {

    motorAutomaticoActivo = false;

}

// Movimiento automático

if (motorAutomaticoActivo) {

    myStepper.step(-10); // Giro continuo hacia atrás

}

delay(2);

return; // Evita ejecutar el modo manual

}

//    MODO MANUAL

motorAutomaticoActivo = false; // Reset por seguridad


// Botón D3 → gira hacia atrás

```

```
if (atrasPressed) {  
  
    myStepper.step(-10);  
  
    delay(2);  
  
}  
  
// Botón D2 → gira hacia adelante  
  
else if (stopPressed) {  
  
    myStepper.step(10);  
  
    delay(2);  
  
}  
  
// Si no se presiona nada → motor detenido  
  
}
```