

## Aprovechamiento de *Tillandsia Recurvata* (Heno Motita, Paxtle) para la elaboración de piel vegetal

### Utilization of *Tillandsia Recurvata* (Heno Motita, Paxtle) for the production of vegetable leather

Yanet Hernández Ortega <sup>a</sup>, Yésica Payán Aceves <sup>b</sup>, Lilia Bautista Cano <sup>c</sup>, Lizete A. Juárez Pérez<sup>d</sup>

#### Abstract:

*Tillandsia recurvata*, known as Heno Motita or Paxtle, is an epiphytic plant widely distributed in Mexico. The problem lies in the fact that its uncontrolled proliferation causes asphyxiation and inhibits photosynthesis in native species such as mesquite, cedar, cypress, citrus, ash, elm, and jacaranda trees. This work stems from observations at the Technological Institute of Pachuca, where paxtle infestation has compromised forest health and led to tree removal. The aim was to analyze the potential use of paxtle (*Tillandsia recurvata*) as a raw material for obtaining sustainable plant-based leather for industrial applications. Biological studies exist on this plant, revealing various uses such as goat feed, ornamental purposes, medicinal treatments, respiratory problems, and as a bioindicator of air pollution. However, no studies have been conducted on its potential for structural applications. As a secondary problem, the conventional leather industry causes serious environmental impacts due to the use of hexavalent chromium (Cr-VI), a Group 1 carcinogen that can cause cancer with prolonged use. The aim of this work is to develop a procedure for obtaining vegetable leather from paxtle (a type of palm). This involved collecting and selecting the paxtle, followed by washing to remove impurities. Next, it underwent pretreatment by blanching it in boiling water, followed by drying, pulverizing it, and mixing it with natural binders such as glycerin and alginate. The mixture was poured into molds, stabilized with calcium chloride, and subjected to controlled drying. From 1 kg of fresh paxtle, approximately 100 g of dry powder were obtained, which was used to manufacture sheets of 3600 cm<sup>2</sup> and 3 mm thickness. The resulting samples exhibited different textures depending on the grind size and distribution within the mold, ranging from smooth and flexible sheets to fibrous and rigid ones. In biodegradability tests, 5 cm<sup>2</sup> fragments dissolved in water in approximately 3 days, generating a solution suitable for irrigation. The results show that paxtle can be transformed into an economical and biodegradable biomaterial, as an alternative to animal and synthetic leather, thus contributing to environmental sustainability and the use of an invasive species.

#### Keywords:

*Biomaterials, sustainability, vegetal leather, Tillandsia recurvata, Paxtle, invasive species, biodegradable materials*

#### Resumen:

*Tillandsia recurvata*, conocido como Heno Motita o Paxtle, es una planta epífita de amplia distribución en México cuyo problema reside en que su proliferación descontrolada genera asfixia e inhibe la fotosíntesis en especies nativas como: los mezquites, cedros, cipreses, cítricos, fresnos, olmos y jacarandas. Este trabajo surge de la observación en el Instituto Tecnológico de Pachuca, donde la infestación del paxtle ha comprometido la salud forestal y derivó en la remoción de árboles, se buscó analizar el potencial de aprovechamiento del paxtle (*Tillandsia recurvata*) como materia prima para la obtención de piel vegetal sostenible en aplicaciones industriales. Existen estudios biológico sobre esta planta, teniendo varias aplicaciones como: alimentos para caprino, de uso

<sup>a</sup> Autor de Correspondencia, Instituto Tecnológico de Pachuca | Departamento de Ingeniería Industrial | Pachuca de Soto-Hidalgo| México, <https://orcid.org/0000-0002-5172-6245>, Email: yanet.ho@pachuca.tecnm.mx

<sup>b</sup> Instituto Tecnológico de Pachuca | Departamento de Ingeniería Industrial | Pachuca de Soto-Hidalgo| México, <https://orcid.org/0009-0002-1144-1568>, Email: l21200509@pachuca.tecnm.mx

<sup>c</sup> Instituto Tecnológico de Pachuca | Departamento de Química | Pachuca de Soto-Hidalgo| México, <https://orcid.org/0009-0002-8610-6684>, Email: lilia.bc@pachuca.tecnm.mx

<sup>d</sup> Instituto Tecnológico de Pachuca | Departamento de Química || Pachuca de Soto-Hidalgo| México, <https://orcid.org/0009-0003-4570-4466>, Email: l21200823@pachuca.tecnm.mx

ornamental, en tratamiento medicinal, para problemas respiratorios y bioindicador de contaminación atmosférica, pero no se tienen estudios sobre aportaciones en cuanto a su aprovechamiento estructural. Como problema secundario, la industria del cuero convencional causa graves impactos ambientales por el uso de cromo hexavalente (Cr-VI), un carcinógeno del Grupo 1 que puede provocar cáncer en su uso prolongado. La propuesta de este trabajo es el desarrollo del procedimiento para la obtención de piel vegetal a partir del paxtle, que consistió en la recolección y selección de este, continuando con el lavado para eliminar impurezas, después se realizó un pretratamiento mediante un escaldado con agua hirviendo, seguido de su secado, pulverizado y mezcla con aglutinantes naturales como glicerina y alginato. La mezcla se vertió en moldes, estabilizándola con cloruro de calcio y sometida a un secado controlado. A partir de 1 kg de paxtle fresco se obtuvieron aproximadamente 100 g de polvo seco, con los que se fabricaron láminas de 3600 cm<sup>2</sup> y 3 mm de espesor. Las muestras obtenidas presentaron diferentes texturas según el tamaño de molienda y la distribución en el molde, con variaciones de láminas lisas y flexibles a fibrosas y rígidas. En pruebas realizadas de biodegradabilidad, fragmentos de 5 cm<sup>2</sup> se disolvieron en agua en aproximadamente 3 días, generando una solución aprovechable para riego. Los resultados evidencian que el paxtle puede transformarse en un biomaterial económico y biodegradable, como alternativa al cuero animal y sintético, contribuyendo así a la sustentabilidad ambiental y al aprovechamiento de una especie invasora.

#### **Palabras Clave:**

*Biomateriales, sustentabilidad, piel vegetal, Tillandsia recurvata, Paxtle, especies invasoras, materiales biodegradables*

## **Introducción**

El paxtle (*Tillandsia recurvata*), también conocido como "heno motita", es una epífita atmosférica extrema perteneciente a la familia Bromeliaceae que crece y se distribuye sobre los árboles en distintas regiones; Pérez Noyola menciona que esta planta se distribuye desde el sur de los Estados Unidos de América hasta la parte central de Argentina y se puede encontrar en altitudes desde el nivel del mar hasta inclusive más de 4000 m.s.n.m; tanto en ecosistemas costeros, bosques de pino y encino, como en matorrales y desiertos (2021). En México, su presencia es notable en regiones semiáridas como el estado de Hidalgo, donde alcanza biomasa de hasta 0.4 Ton/Ha sobre árboles hospederos o forofitos como el mezquite (*Prosopis laevigata*) (Romo-Campos et al., 2009; Saldaña-Acosta, 2015).

A diferencia de las plantas parásitas, el paxtle utiliza a los árboles únicamente como soporte; sin embargo, su proliferación desmedida genera un "parasitismo estructural" (Pérez Noyola, 2021). Tiene la capacidad de adaptarse en diferentes ambientes, pero se desarrolla principalmente en climas secos y templados; el Arboretum de la Universidad Francisco Marroquín, mencionó: "es frecuente en áreas abiertas, desde Carolina del Norte hasta Argentina y Chile" (s.f.). En México, es común encontrarlo en estados del centro y norte del país, así como en áreas urbanas donde aprovecha la infraestructura para expandirse.

Su textura fibrosa y su crecimiento acelerado le permiten adherirse con facilidad a ramas y estructuras. En principio no representa un riesgo directo para el medio ambiente, sin embargo, su proliferación excesiva ha generado la percepción de que constituye una plaga. El Diario de Querétaro, describe: "el heno motita crece sobre los

árboles y, al cubrirlos en exceso, puede debilitar o incluso matar ejemplares de encino, mezquite y huizache" (2023). De forma similar, La Jornada de San Luis reporta que "su abundancia excesiva provoca la disminución de la fotosíntesis y dificulta la respiración de las ramas" (La Jornada San Luis, 2019).

Aunque esta epífita está asociada a un problema, se ha buscado el aprovechamiento de esta. Hernández et al. (2023) realizaron un estudio acerca de las características nutricionales del heno de motita, con el objetivo de usarlo en la alimentación de caprinos; los resultados mostraron que esta planta contiene un 9.5% de proteína cruda (PC) y que puede emplearse de manera segura en la alimentación de caprinos (Hernández et al., 2023; Wagner & González, 2024). Además, se ha usado como bioindicador para identificar puntos críticos de contaminación en zonas urbanas y poder monitorear la calidad del aire (Miranda et al., s. f.). También ha tenido una aplicación como material ornamental en los nacimientos navideños y en la elaboración de los arcos florales y altares (Francisco-Ventura et al., 2018). Con ello se identifica una oportunidad de aprovechamiento: en lugar de considerarse únicamente como desecho, el paxtle puede explorarse como recurso natural para el desarrollo de materiales alternativos.

Tal como menciona la Revista Agraria, "el manejo adecuado de esta especie permite convertirla de plaga forestal a recurso útil" (2022). A pesar del conocimiento biológico del paxtle, no existe conocimiento científico aplicado en la caracterización de sus fibras para aplicaciones industriales estructurales; de esta forma, es posible plantear su aplicación en la elaboración de láminas con propiedades similares a las del cuero, capaces de integrarse en aplicaciones de diseño y manufactura sostenible sustituyendo productos de origen

animal o sintético, ya que el proceso para la obtención del cuero genera contaminación de agua y del subsuelo.

Actualmente, la industria de la marroquinería en México produce más de 260 millones de pares de calzado (CICEG, 2024), pero depende de procesos de curtido con cromo CrVI, además, Vidaurri-Ramírez y Morgan-Beltrán (2011) expresan que la Cámara de la Industria de la curtiduría ubicada en el Estado de Guanajuato participa en un 60% en la producción nacional de cuero contribuyendo al deterioro del recurso hídrico. De igual forma, datos de la secretaría de economía (2023), los productos de piel sintética a base de poliuretano (PU) y el PVC representan más de 100 millones de unidades de accesorios de bajo costo circulando en México, representando nula biodegradabilidad y acumulación de microplásticos en ecosistemas urbanos.

El mercado actual de biomateriales ofrece opciones como el Piñatex (piña) que utiliza fibras de desecho de piña (Ecoembes, 2025), el Desserto (cactus) desarrollado a partir de biomasa de cactus en Jalisco (Tariq et al., 2023) o el Muskin realizado a base de hongos (Grado Zero Space, s.f.). Sin embargo, a diferencia de los cultivos agrícolas, el paxtle es una especie epífita invasora que compromete la salud de hospederos, por lo que su transformación en biomaterial además de ser una alternativa de material, ofrece ser una manera de saneamiento ecológico regional (Pérez Noyola, 2021).

El presente trabajo se centra en explorar de forma experimental la transformación del paxtle en un biomaterial (piel vegetal) a base de sus fibras con la aplicación del método científico mediante procesos de escaldado, deshidratación, trituración, mezcla con aglutinantes naturales y secado controlado, se busca evaluar su viabilidad como alternativa sostenible.

Para contextualizar el panorama actual, en la Tabla 1 se analizan las alternativas del mercado con respecto a diferentes pieles.

Tabla 1. Análisis comparativo de materiales tipo piel existentes en el mercado. Fuente: Elaboración propia con datos de CICEG (2024), Secretaría de Economía (2023) y Tariq et al. (2023).

Piel	Origen	Accesorio principal y unidades/Año (México)	Región	Características	Fuente
Paskin (Paxtle)	<i>T. recurvata</i>	Espesor de 3 mm ideal para zapateros, cinturones, carteras, fundas, empaques.	Centro de México (Hidalgo, CDMX, Querétaro, Puebla)	Biodegradable (30%). Buena aceptabilidad a materia prima y aprovechamiento de residuo orgánico.	Este estudio
Poliuretano (PU)	Petróleo	Carteras y moda rápida. ~60,000,000 unidades.	Importación, China	Bajo costo, pero genera microplásticos no degradables.	Secretaría de Economía (2022)
PVC (Vinilo)	Petróleo y cloro	Cinturones y calzado económico ~80,000,000 unidades.	Nacional	Bajo costo y alta productividad, pero alta toxicidad en su producción; nula biodegradabilidad.	IARC (2012)
Piel Bovina	Bovinos	Cinturones aprox. 10,000,000 unidades, zapatería +250 millones de pares.	Guanajuato	Alta resistencia, residuo de curtido (Cr-VI) nocivo.	CICEG (2024)/ Vidaurri (2011).
Desserto	Nopal	Bolsos de lujo y zapatería de autos 2,000,000 - 5,000,000 unidades.	Jalisco	Base vegetal. Estética premium. Requiere riego y tierras de cultivo.	Tariq et al. (2023).
Piñatex	Piña	Tenas, correas y bolsos. 500,000 - 1,000,000 unidades.	Veracruz	Aprovechamiento de residuo agrícola. Alto costo logístico (importado).	Ecoembes (2025)/ Ananas Anam.
MuSkin	Hongo	Detalles y accesorios de moda, eventos de 100,000 unidades.	Sur de México	Tacto de gamuza agradable. Producción artesanal limitada.	Life Materials (s.f.).

## Metodología

En esta investigación se consideraron los pasos del método científico que llevaron al análisis, desarrollo y obtención de la piel vegetal a partir del paxtle. A continuación, se describen cada uno de ellos.

### Observación y diagnóstico del recurso.

En distintas regiones del estado de Hidalgo se observa un crecimiento acelerado de *Tillandsia recurvata* (conocida localmente como paxtle) sobre árboles como huizaches, especies latifoliadas y mezquites, especies de alto valor ecológico y cultural en la región (Hernández, 2021). En el contexto inmediato, el área de estudio se delimitó al campus del Instituto Tecnológico de Pachuca, donde se realizó un censo previo de la población de árboles, y se identificó que la densidad de *T. recurvata* alcanzó niveles críticos de parasitismo estructural, donde se pudo reconocer la presencia del paxtle en varios ejemplares de árboles del campus, mostrando ramas cubiertas casi por completo, con diferencias notorias en su vitalidad y follaje con respecto a ejemplares sanos (Figura 1). Esta situación permitió identificar, de manera directa y cotidiana, un fenómeno ambiental que afecta la salud de los árboles, mostrando la importancia de establecer protocolos de recolección y aprovechamiento biotecnológico del paxtle antes de que el daño forestal sea irreversible.

El paxtle, aunque no es biológicamente un parásito, actúa como especie invasora al reproducirse de forma masiva y cubrir extensamente las ramas de los árboles, bloqueando la luz solar y limitando su capacidad

fotosintética, lo cual debilita a los árboles hospedadores generando un “parasitismo estructural” y provocando



Figura 1. Árboles dañados por el Heno Molita. Fuente: Elaboración propia.

### Planteamiento del problema

Pérdida de ramas e incluso su muerte: un estudio científico (Romo-Campos et al., 2009) demostró una correlación directa y significativa entre la infestación por *Tillandsia recurvata* y una mayor muerte de flores, lo que reduce el éxito reproductivo del árbol hospedador bloqueando la luz solar y limitando la capacidad fotosintética del hospedero, además de obstruir las estomas de las ramas, lo que dificulta su respiración y debilita de forma progresiva la salud forestal (La Jornada.

San Luis, 2019; Romo-Campos et al., 2009). Investigaciones anatómicas también confirman que la planta modifica el sistema vascular de las ramas, obstruyendo el flujo de agua y siendo la causa directa de la alta mortalidad de estas (Saldaña-Acosta, 2015). Esta problemática llama la atención en el Instituto Tecnológico de Pachuca. Mediante una fase de observación y diagnóstico dentro del campus, se constató que la densidad de infestación por heno motita comprometió la integridad de una parte importante de la población arbórea, lo que evidencia que el problema de la proliferación del paxtle requiere de una atención inmediata.

Actualmente, el paxtle retirado en procesos de saneamiento es desechado sin ningún tipo de aprovechamiento, ignorando su potencial como recurso fibroso.

A la par, la industria del cuero convencional representa un problema ético y ambiental debido a la contaminación del agua derivada de procesos de curtido (Kefale, 2023; PETA Latino, 2022); por su parte, las alternativas sintéticas, como el poliuretano, tampoco

representan una solución sostenible al generar micro plásticos durante su uso y degradación. Esta industria representa riesgos para la salud de sus trabajadores, debido a que la exposición a compuestos de cromo hexavalente (Cr-VI), un químico fundamental en el curtido es tan peligroso que la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) lo clasifica como un carcinógeno del Grupo 1, es decir, altamente cancerígeno para los humanos (IARC, 2012). Los trabajadores de las curtidorías sufren con frecuencia de dermatitis, úlceras cutáneas y perforación del tabique nasal, un estudio en Bogotá encontró que los trabajadores expuestos a las curtiembres tenían 4.33 veces más probabilidades de presentar alteraciones de salud atribuibles al cromo en comparación con la población no expuesta (Idrovo & Varona, 2009).

Así mismo, la producción de accesorios sintéticos (PU y PVC), que supera las 100 millones de unidades anuales impulsado principalmente por el sector de la 'moda rápida' y las importaciones, se encuentra en el mercado con productos de nula biodegradabilidad que además producen micro plásticos nocivos para la salud (Secretaría de Economía, 2023), en una encuesta realizada a 175 empresas de cuero sintético en China, en 2014, se mostró que la mayoría de las empresas no toman medidas para la recolección de gases contaminantes por el uso de solventes en la elaboración del cuero sintético como son DMF, tolueno, acetato de metilo, acetona, acetato de etilo y butanona, lo que contribuye a la contaminación del aire (Xu et al., 2019).

### Hipotesis

Es posible transformar las fibras de *Tillandsia recurvata* mediante un proceso de estabilización con aglutinantes naturales (alginato y glicerina) y cloruro de calcio para obtener un biomaterial con propiedades físicas y de biodegradabilidad comparables a los estándares de la marroquinería pequeña, permitiendo la sustitución de materiales sintéticos y animales mediante el aprovechamiento de un residuo forestal y contribuyendo a la reducción de su presencia en el entorno.

### Experimentación

En el siguiente diagrama (Figura 2) se muestran los pasos del proceso que se siguieron en esta fase.

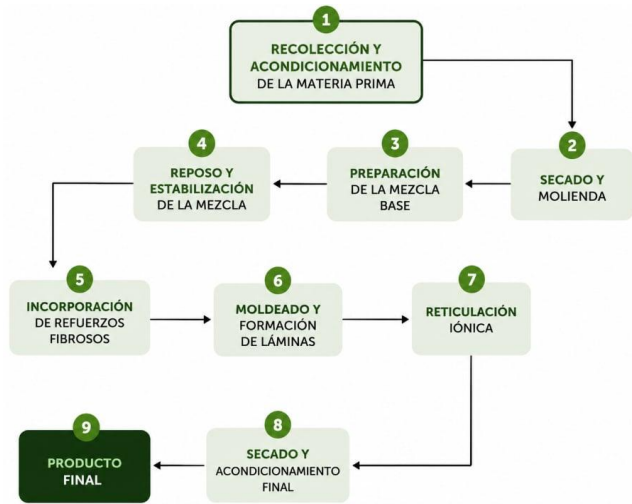


Figura 2. Metodología para la preparación de la piel sintética. Fuente: Elaboración propia

### Recolección y acondicionamiento de la materia prima

La materia prima vegetal, proveniente de *Tillandsia recurvata* (paxtle), también conocido como heno motita, se recolectó en estado fresco de árboles infestados y de materia caída de los mismos, para después seleccionar manualmente la materia prima procurando minimizar la presencia de impurezas (ramas, piñas, plumas, insectos, etc). Posteriormente, se realizó un prelavado con agua corriente y un escaldado para inactivar enzimas y limpiar la fibra (University of Georgia, 2025) mediante inmersión en agua en ebullición (94 °C) durante 10 min (Figura 3). Este tratamiento térmico, seguido de un enfriamiento rápido en agua fría, tuvo como objetivo eliminar contaminantes microbianos y detener procesos enzimáticos que pudieran afectar la calidad del material.



Figura 3. Procedimiento de escaldado en agua hirviendo. Fuente: Elaboración propia.

### Secado, molienda y estandarización de partículas

El material vegetal se sometió a un proceso de secado controlado para reducir su contenido de humedad y facilitar la molienda (Figura 4). Posteriormente, para

algunas muestras se trituró en un molino de discos y para otras muestras un procesador multifuncional hasta obtener un polvo fino y homogéneo en ambos casos (Figura 5). La reducción de tamaño de partícula es importante debido a que influye directamente en la textura, densidad y propiedades mecánicas del biomaterial obtenido.



Figura 4. Proceso de secado de materia prima (Paxtle). Fuente: Elaboración propia.



Figura 5. Molienda de paxtle utilizando un molino de discos. Fuente: Elaboración propia.

### Preparación de la mezcla base

En un recipiente resistente al calor se calentó agua, sobre la cual se adiciono gradualmente el polvo vegetal (paxtle o heno motita). A la suspensión se agregaron aditivos funcionales, como:

1. **Alginato de sodio**, como agente gelificante, capaz de formar redes tridimensionales mediante reticulación iónica.
2. **Glicerina**, como plastificante, para conferir flexibilidad al material final.
3. **Aceite de coco fundido**, como modificador hidrofóbico, que mejora la resistencia a la humedad y la elasticidad de las láminas.

La mezcla se homogeneizó con un agitador mecánico hasta obtener una dispersión densa y libre de grumos (Figura 6).



Figura 6. Proceso de mezclado sometidos a agitación mecánica. Fuente: Elaboración propia.

### Reposo y estabilidad de la mezcla

La dispersión se dejó reposar a temperatura ambiente durante 12 a 24 horas. Este periodo permitió la interacción molecular entre polisacáridos y plastificantes, favoreciendo la cohesión interna y la estabilidad de la matriz polimérica.

### Incorporación de refuerzos fibrosos

Tras el reposo, se añadieron fibras de refuerzo (lana cortada en pequeños fragmentos), mezclándolas uniformemente. La incorporación de fibras actúa como fase dispersa de refuerzo, incrementando la resistencia al desgarrar y mejorando la integridad estructural de la bio piel.

### Moldeado y formación de láminas

La mezcla final se vertió en bandejas planas, distribuyendo de manera uniforme para obtener láminas de espesor constante (Figura 7). En algunos casos, se incorporaron capas intermedias de algodón como soporte adicional.



Figura 7. Vertido de la mezcla final en moldes planos. Fuente: Elaboración propia.

### Reticulación iónica

Las láminas en estado húmedo fueron sometidas a aspersión con una solución de cloruro de calcio. Este paso es esencial, ya que los iones  $Ca^{2+}$  reaccionan con

los grupos carboxilato del alginato de sodio, formando enlaces cruzados que otorgan rigidez y estabilidad a la red polimérica.

### Secado y acondicionamiento final

Las láminas se dejaron secar en un ambiente ventilado durante 3 a 5 días, moviéndolas periódicamente para asegurar una deshidratación uniforme en ambas caras. Al alcanzar un contenido de humedad equilibrado, se obtuvo un material flexible y resistente, con propiedades mecánicas comparables a las de una piel natural (Figura 8).



Figura 8. Mezcla semi seca distribuida en molde plano previo al proceso de secado final. Fuente: Elaboración propia.

### Producto final

El resultado del proceso fue una lámina bio polimérica (Figura 9) denominada piel vegetal elaborada a partir de recursos naturales (paxtle o heno motita), con potencial aplicación en la confección de accesorios u otros productos sostenibles (Figura 10).



Figura 9. Muestra de lámina bio polimérica final. Fuente: Elaboración propia.



Figura 10. Accesorio elaborado a partir de lámina bio polimérica tipo piel vegetal. Fuente: Elaboración propia.

Nota: Las condiciones climáticas influyen en el tiempo de secado según la cantidad de mezcla y el tamaño del molde.

## Resultados

Se obtuvieron diferentes muestras de láminas tipo piel vegetal: De un pulverizado fino se obtiene una lámina más homogénea y lisa (Figura 11), mientras que de un pulverizado grueso se obtiene una lámina rugosa con textura fibrosa (Figura 12).



Figura 11. Lámina bio polimérica obtenida con tonalidad más clara y textura lisa. Fuente: Elaboración propia



Figura 12. Lámina bio polimérica con tonalidad más oscura y textura rugosa. Fuente: Elaboración propia.

De un molde grande con la mezcla distribuida se obtienen láminas delgadas y flexibles, mientras que de un molde pequeño con la mezcla concentrada se obtienen láminas más gruesas y resistentes.

Rendimiento: De 1 kg de paxtle fresco se pueden obtener aproximadamente 100 g de fibra/polvo seco, equivalentes a aproximadamente 3600 cm<sup>2</sup> de lámina de 3 mm de espesor (Figura 13).



Figura 13. Lámina biopolimérica obtenida en molde plano, equivalente a un área aproximada de 3600 cm<sup>2</sup> de lámina de 3 mm de espesor. Fuente: Elaboración propia.

En pruebas de degradabilidad, basadas en los principios de degradación en medios acuosos (ISO, 2019), un fragmento de 5 cm<sup>2</sup> se disolvió en 100 ml de agua en un lapso de 72 horas, resultando en una solución aprovechable para riego (Figuras 14 y 15).



Figura 14. Inicio del proceso de disolución de un fragmento de 5cm<sup>2</sup> como evaluación de su comportamiento en el medio acuoso. Fuente: Elaboración propia.



Figura 15. Disolución completa del fragmento de 5 cm<sup>2</sup> en agua tras 72 horas de inmersión. Fuente: Elaboración propia.

Las propiedades y características del biomaterial desarrollado en comparación a otro tipo de materiales se encuentran reflejados en la tabla 2.

Tabla 2. Tabla comparativa de cuero bovino, sintético y piel vegetal. Fuente: Elaboración propia con datos de Gündoğan (2024), Meyer et al. (2021) y Wijayarathna et al. (2025).

Características	Cuero bovino	Cuero sintético	Piel vegetal de paxtle (Estimado)
Resistencia a la tracción (MPa)	15-39 Mpa (Norma ISO / estudios) MaxpellKTH Diva portal	9-13 MPa KTH Diva portal	2-6 Mpa (estimado)
Elasticidad (%)	-	-	10-25% (estimado)
Biodegradabilidad	Lenta (>10 años)	No biodegradable	Semanas/meses (Observación)
Costo estimado (\$/m <sup>2</sup> )	445-692 \$ (Industrial)	179-357 \$	36- 90 \$ (Artesanal estimado)

Los valores para cuero bovino y sintético están respaldados por estudios técnicos y normas citadas (Gündoğan, 2024; Meyer et al., 2021); los valores para paxtle son estimaciones iniciales basadas en resultados preliminares (Tabla 3).

Tabla 3. Comparación entre cuero animal, cuero sintético y piel vegetal de paxtle. Fuente: Elaboración propia.

Características	Cuero animal	Cuero sintético	Piel vegetal de paxtle
Materia prima	Piel de bovinos (requiere sacrificio)	Derivados de petróleo	<i>Tillandsia recurvata</i> (planta epífita mexicana)
Impacto ambiental	Alta contaminación en curtido, uso de aguas y químicos tóxicos	Genera microplásticos, no biodegradable	Biodegradable uso de recurso abundante y poco valorado
Costo de producción	Altos (procesos industriales y ganadería)	Medios, depende de polímero y energía	Bajos (proceso artesanal con aglutinantes naturales)
Propiedades mecánicas	Alta resistencia y durabilidad	Buenas resistencia, pero menor flexibilidad	Resistencia variable (dependiendo del proceso y aditivos)
Textura y apariencia	Lisa, flexible, estandarizada	Lisa, homogénea, variedad de colores	Rugosa o lisa según molienda, apariencia natural
Biodegradabilidad	Lenta (años)	No biodegradable	Rápida (se degrada en agua en semanas o meses)
Potencial de innovación	Tradicional, mercado maduro	Limitado por impacto ambiental	Alto, con aplicaciones en diseño sostenible y economía circular

## Conclusiones

La elaboración de piel vegetal a partir del paxtle demuestra que una especie considerada invasora puede transformarse en un recurso de valor agregado, pues los resultados confirman que la *T. recurvata* posee una viabilidad técnica superior para la manufactura de accesorios de ciclo de vida corto o medio. Este proceso ofrece una alternativa resistente, sostenible y funcional frente al cuero animal y sintético, además de ayudar a disminuir el impacto ambiental de la especie en los ecosistemas. La novedad científica radica en la valorización de una plaga invasora para generar 3600 cm<sup>2</sup> de material por cada kilogramo de planta, ofreciendo una solución de economía circular de saneamiento que beneficia directamente a ecosistemas afectados como el del Instituto Tecnológico de Pachuca, aunado a esto, se demostró que es un material biodegradable en agua. De esta manera, se logra un doble beneficio: aprovechar un recurso subutilizado y, al mismo tiempo, reducir su proliferación en el entorno.

Es importante reconocer que el desarrollo se encuentra actualmente en una fase de desarrollo artesanal, por lo cual el espesor de las láminas no es definitivo y existe variabilidad en las texturas obtenidas. El prototipo se ha generado bajo condiciones climáticas normales, identificando la necesidad de estandarizar el proceso de secado hacia métodos más rápidos y eficientes para garantizar una calidad industrial constante y una estabilidad mecánica comparable a los estándares internacionales de acuerdo a la norma ASTM D882 (2018). No obstante, esta fase permite que el prototipo (Paxkin) funcione como base para explorar los usos industriales del paxtle como material para empaques biodegradables, revestimientos aislantes u otro tipo de

textiles, aprovechando su abundancia y el desperdicio ambiental que representa. Además, se puede ver a Paxkin como un competidor viable en el sector de la marroquinería pequeña y accesorios.

Este estudio sienta las bases para el aprovechamiento industrial del paxtle y el desarrollo de posteriores investigaciones en su aprovechamiento, siendo una estrategia de saneamiento ambiental. En cuanto a las normativas para el aprovechamiento de recursos forestales no maderables, la recolección de esta especie con fines de control biológico no está prohibida, siempre que se sigan los lineamientos de manejo sustentable para evitar afectaciones colaterales al ecosistema (CEDRSSA, 2022), facilitando la implementación de soluciones que puedan transformar una amenaza forestal en una oportunidad de desarrollo sostenible.

## Referencias

- Arboretum UFM. (s.f.). *Tillandsia recurvata*. Universidad Francisco Marroquín. Recuperado el 11 de Mayo de 2025, de <https://arboretum.ufm.edu/plantas/tillandsia-recurvata/>
- ASTM International. (2018). ASTM D882-18: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. ASTM International. <https://www.astm.org/d0882-18.html>
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA). (2022). Problemática y aprovechamiento sustentable del musgo en México. Cámara de Diputados.
- CICEG. (2024). Estadísticas del Sector Calzado y Marroquinería en México. Cámara de la Industria del Calzado del Estado de Guanajuato. Recuperado de: <https://cicg.org/>
- Desserto. (s.f.). Frequently Asked Questions. Consultado el 20 de septiembre de 2025, en <https://desserto.com.mx/faq>
- Diario de Querétaro. (2023, 14 de enero). Cabañuelas: *Tillandsia recurvata*, plaga y alimento para caprinos. Diario de Querétaro. <https://www.diariodequeretaro.com.mx/analisis/cabanuelas-tillandsiarecurvata-plaga-y-alimento-para-caprinos-10452794.html>
- Ecoembes. (2025, 11 junio). Piñatex: El cuero vegetal que se hace con piña. *Ecoembes Reduce Reutiliza y Recicla*. <https://reducereutilizarecicla.org/pinatex-el-cuero-vegetal-que-se-haceconpina/#:~:text=Se%20hace%20a%20partir%20de,plantaciones%20o%20us%20como%20biog%C3%A1s..>
- Francisco-Ventura, E., Menchaca-García, R. A., Toledo-Aceves, T., & Krömer, T. (2018). Potencial de aprovechamiento de epífitas vasculares caídas en un bosque mesófilo de montaña de Los Tuxtlas, Veracruz, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 89(4). <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2018.4.2390>
- Grado Zero Space. (s.f.). Muskin. Life Materials. Consultado el 20 de septiembre de 2025, en <https://www.lifematerials.eu/muskin/>
- Gündoğan, S. (2024). Mechanical and Physical Properties of Bovine and PU Synthetic Leather. [Tesis de Licenciatura, KTH Royal Institute of Technology]. KTH Diva Portal.
- Hernández, E. (2021). Valor cultural de mezquite (*prosopis spp*) como árbol de usos múltiples en el ejido santa bárbara [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Chapingo]. Repositorio Institucional de la UACH. Recuperado de: <https://repositorio.chapingo.edu.mx/server/api/core/bitstreams/93d51fc2-6ad1-46b4-bf7a-30791c6f10e6/content>
- Hernández, L. G., Pérez, D., & Ángeles, S. (2023). Aprovechamiento de heno de mota (*Tillandsia recurvata*) henificado en dieta de ganado caprino. Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/389068390>
- Idrovo, J., & Varona, M. (2009). Niveles de Cromo y Alteraciones de Salud en una Población Expuesta a las Actividades de Curtiembres en Bogotá, Colombia. *Revista de Salud Pública*, 11(2), 252-263.
- International Agency for Research on Cancer (IARC). (2012). Arsenic, Metals, Fibres, and Dusts. A Review of Human Carcinogens. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 100C.
- International Organization for Standardization (ISO). (2019). ISO 17556:2019: Plastics — Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in soil by measuring the oxygen demand in a respirometer or the amount of carbon dioxide evolved. ISO. <https://www.iso.org/standard/72044.html>
- Kefale, T. (2023). A review on bio-leather production: An alternative to animalbased leather. Semantic Scholar. Recuperado de: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Systematic-Review-onPotential-Bio-Leather-for-Kefale-Kebede/0e778b56edb2d9501cd8ee676e024a55891bef71>
- Krömer, T., et al. (2018). Aprovechamiento sostenible de epífitas vasculares: ¿una opción para mejorar los ingresos de las comunidades rurales en la Sierra de Juárez (Oaxaca)? En G. Williams-Linera (Ed.), *Neblinas de la Sierra Madre Oriental* (pp. 1-18). Universidad Veracruzana. Recuperado de [https://www.uv.mx/personal/tkromer/files/2019/03/Kr%C3%B6mer-et-al.-2018\\_Aprovechamiento-de-epifitas\\_Cap-9.pdf](https://www.uv.mx/personal/tkromer/files/2019/03/Kr%C3%B6mer-et-al.-2018_Aprovechamiento-de-epifitas_Cap-9.pdf)
- La Jornada San Luis. (2019, 17 de diciembre). Conafor alerta sobre riesgo de adquirir heno motita. La Jornada San Luis. Recuperado de <https://lajornadasanluis.com.mx/conafor-alerta-sobre-riesgo-de-adquirirheno-motita/>
- Miranda, A. G. C., Chaparro, M. A., Chaparro, M. A., & Böhnell, H. N. (s. f.). Magnetic properties of *Tillandsia recurvata* L. and its use for biomonitoring a Mexican metropolitan area. *Ecological Indicators*, 60, 125-136. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.025>
- Meyer, M., Dietrich, S., Schulz, H., & Mondschein, A. (2021). Comparative study of the physical and mechanical properties of chrome and wet-white tanned leathers. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 116(4), 133-143. Recuperado [https://www.researchgate.net/publication/349299763\\_Comparison\\_of\\_the\\_Technical\\_Performance\\_of\\_Leather\\_Artificial\\_Leather\\_and\\_Trendy\\_Alternatives](https://www.researchgate.net/publication/349299763_Comparison_of_the_Technical_Performance_of_Leather_Artificial_Leather_and_Trendy_Alternatives)
- PETA Latino. (2022). La industria del cuero. Recuperado de: <https://www.petalatino.com/sobre/la-industria-del-cuero/>
- Pérez Noyola, F. (2021). Efecto del calentamiento inducido en la supervivencia y crecimiento de epífitas: evidencia experimental en *Tillandsia recurvata* (Bromeliaceae) en el sur del desierto chihuahuense [INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.]. Recuperado De:

<https://repositorio.ipicyt.edu.mx/bitstream/handle/11627/5552/TES-DCAperezNoyolaEfectoCalentamiento.pdf?sequence=7&isAllowed=y>

Revista Agraria. (2022). Estrategias de manejo de *Tillandsia recurvata* en bosques de pino cembroides. *Revista Agraria*, 35(2), 45-52. Recuperado de: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/985/61593s.pdf?sequence=1>

Romo-Campos, R. L., Flores-Rentería, L., & Zuno-Delgadillo, M. (2009). Efecto de *Tillandsia recurvata* L. (Bromeliaceae) sobre el éxito reproductivo de *Fouquieria splendens* Engelm. (Fouquieriaceae). *Acta Botánica Mexicana*, (86), 113-122.

Saldaña-Acosta, A. (2015). Efecto anatómico y ecofisiológico de la epífita *Tillandsia recurvata* (Bromeliaceae) en su hospedero *Prosopis laevigata* (Fabaceae).

Secretaría de Economía. (2023). Perfil de la Industria del Cuero y Calzado en México. Gobierno de México. Data México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/se/articulos/la-industria-del-calzado-en-mexico>

Tariq, M., et al. (2023). Development and characterization of sustainable and biodegradable vegan leather based on cactus biomass. ResearchGate.

University of Georgia (2025). Escaldado de verduras. Recuperado de: [https://nchfp.uga.edu/how/freeze/freeze-general-information/blanching-vegetables/#:~:text=Crema%20batida%20congelada,.Escaldar%20verduras,\(p%C3%A1ginas%20229%2D230\)](https://nchfp.uga.edu/how/freeze/freeze-general-information/blanching-vegetables/#:~:text=Crema%20batida%20congelada,.Escaldar%20verduras,(p%C3%A1ginas%20229%2D230)).

Vidaurre-Ramírez, J. F., & Morgan-Beltrán, J. (2011). La sustentabilidad en la industria de la curtiduría y su relación con el entorno urbano. El caso de León, Guanajuato, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 51, 25-32. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2011516814>

Wagner, H., & González, A. (2024). Aprovechamiento de heno motita (*Tillandsia recurvata*) en caprinos. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/389068390\\_Aprovechamiento\\_de\\_heno\\_motita\\_en\\_caprinos](https://www.researchgate.net/publication/389068390_Aprovechamiento_de_heno_motita_en_caprinos)

Wijayarathna, K. A. N., et al. (2025). Mechanical properties of natural leather and their simulation in Ansys. *Nature*. Recuperado de: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-98361-w>

Xu, J., Wang, Z., Song, S., Xu, Z., & Yao, Y. (2019). [Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province]. *PubMed*, 40(8), 3463-3469. <https://doi.org/10.13227/j.hjkx.201812214>