

Prevención y control de erosión en taludes mediante uso de geotextiles derivados del fique

Prevention and control of erosion on slopes through the use of geotextiles derived from fique

Camacho R. Andrés Leonardo

Universidad Santo Tomás de Aquino
andres.camachor@usantoto.edu.co

Díaz A. Mabel Vannesa

Universidad Santo Tomás de Aquino
mabel.diaz@usantoto.edu.co

Torres M. Angie Gabriela

Universidad Santo Tomás seccional Tunja
Daniela.torrem@usantoto.edu.co

Resumen

Los problemas de erosión en taludes son muy comunes debido a que son estructuras que están expuestas a la intemperie, por lo tanto, se encuentran constantemente sometidas a fenómenos naturales como lluvias, fuertes vientos y vibraciones por flujo vehicular. De esta manera, es necesario implementar elementos de recubrimiento en la superficie del talud con la finalidad de disminuir el riesgo de falla. Comúnmente los geomantos se fabrican a partir de productos derivados de polímeros, estos presentan excelentes condiciones de resistencia y durabilidad pero, al ser materiales sintéticos, son altamente contaminantes y no son biodegradables. La finalidad del presente artículo de investigación es la revisión y comparación de diferentes citas bibliográficas en las que se evalúan características mecánicas de la fibra de fique (resistencia a la tracción, rigidez, módulo de elasticidad, etc.); para determinar así su comportamiento y factibilidad hacia su posible uso a futuro en la fabricación de geomembranas para la sustitución de materiales sintéticos. En este caso, se logra identificar que la resistencia del fique depende directamente de la metodología empleada del tratamiento de la fibra, un material útil para la protección superficial de taludes ya que llega a controlar los problemas de erosión.

Palabras clave: Fibras naturales, fique, estabilidad de taludes, materiales sostenibles, cuidado al medio ambiente, erosión...

Abstract

Erosion problems on slopes are very common because they are structures that are exposed to the elements; therefore, they are constantly affected by natural phenomena such as rain, strong winds and vibrations due to vehicular flow. In this way, it is necessary to implement cover elements on the surface of the slope to reduce the risk of failure. Geomats are commonly manufactured from products derived from polymers, these have excellent conditions of resistance and durability but being synthetic materials are highly polluting and are not biodegradable. The purpose of this research article is the review and comparison of different bibliographical citations in which the mechanical characteristics of fique fiber (tensile strength, stiffness, modulus of elasticity, etc.) are evaluated; to determine this way, its behavior and feasibility made its possible use in the future in the manufacture of geo-membranes for the substitution of synthetic materials. In this case, it is possible to identify that the resistance of the fique depends directly on the methodology used for the treatment of the fiber, this is a useful material for the surface protection of slopes since it manages to control erosion problems.

Keywords: Natural fibers, fique, slope stability, sustainable materials, care for the environment, erosion.

Para citar este artículo: Camacho R., Andrés L.; Díaz A., Mabel V.; Torres M., Angie G. "Prevención y control de erosión en taludes mediante uso de geotextiles derivados del fique" In L'Esprit Ingenieur. Vol. 13-1, pp. 37-62.

1. INTRODUCCIÓN

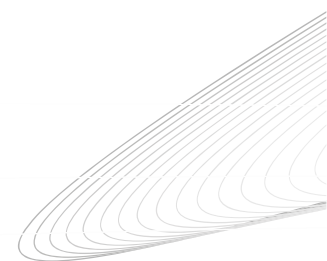
El fique es una planta clasificada taxonómicamente en la familia *agavaceae* y correspondiente al género *Furcraea*; también es su nombre científico. El cultivo de esta planta se presenta en diversos países latinoamericanos como lo son: Brasil, Colombia, Ecuador, Guatemala, México, Venezuela y el Caribe, además de países como Tanzania, Kenia y Madagascar, entre otros, debido a que se adapta a distintas condiciones agroecológicas. Internacionalmente se conoce esta especie de planta como fique, agave, pita, sisal, maguey, penca o cabuya.

Dentro de sus usos se resalta que tradicionalmente en Latinoamérica se ha empleado el fique en tejidos artesanales y en distintos países productores en los últimos años se ha implementado la fibra como materia prima del sector textil, industrial e incluso como abono orgánico. Sin embargo, el objetivo del presente artículo de investigación consiste en revisar y comparar distintas referencias bibliográficas mediante las cuales sea posible evaluar características mecánicas (resistencia a la tracción, rigidez y módulo de elasticidad) de fibras de origen natural especialmente del fique para de esta manera, conocer su comportamiento teórico y la viabilidad al implementar a futuro geo-membranas en la estabilización de taludes a partir de dichas fibras para que sustituyan el uso de materiales como: HDPE (Polietileno de alta densidad), VFPE (Polietileno de baja densidad), elastómero bituminoso, polipropileno (PP) o el cloruro de polivinilo (PVC).

Por lo que, para hacer del fique un material eco amigable en la ingeniería civil, se requiere determinar la factibilidad de reemplazar fibras de plásticos en obras de estabilización de taludes, aditivos para concretos, estabilizantes de terrenos y mediante la utilización de esta fibra en el mundo basado en la bibliografía, puesto que las constantes problemáticas por deslizamientos de grandes volúmenes de material en el planeta, han generado la búsqueda de distintas alternativas que mitiguen los problemas de estabilidad en terrenos inclinados.

No obstante, a causa de las diferentes condiciones de topografía y de relieve mundialmente se han generado distintos desprendimientos de material (caída de rocas y deslizamientos de tierra) que ocasionan grandes afectaciones estructurales a las viviendas aledañas, desestabilización en los terrenos y daños a los diferentes corredores viales en las regiones donde se causan problemas de comunicación entre poblaciones. Por lo cual, se hace necesaria la construcción de estructuras inclinadas (taludes) compuestas de un biomanto con la finalidad de protegerlas de los distintos sucesos naturales (lluvia e infiltración, fuertes vientos, erosión, etc.) a los cuales se expone dicha estructura constantemente; ofreciendo así, grandes beneficios como el bajo costo, impacto positivo al medio ambiente y gran disponibilidad de este insumo para dar solución ingenieril a dichas fallencias presentes en la actualidad.

Se debe tener en cuenta que, como consecuencia la problemática ocasiona inconvenientes no solo en el ámbito económico, sino también social, puesto que se pone en peligro la integridad de quienes transitan a diario por estas zonas de riesgo, debido a la falta de protección superficial de los taludes; motivo por el cual, se requiere de atención inmediata. Dentro de la caracterización de la fibra de fique; en primer lugar, se realiza una revisión del estado del arte mediante la evaluación de criterios en los que se encuentran aspectos como la contaminación generada actualmente por el uso de geomantos a base de polipropileno y poliéster.



1.1 Revisión bibliográfica

A partir de la revisión bibliográfica se han podido determinar diferentes estudios enfocados en la estabilidad de taludes y control de erosión mediante el uso de fibras naturales en especial la de Figue a nivel internacional. Actualmente, campos como los de la bioingeniería y biotecnología han identificado diferentes técnicas en el control del suelo, por medio de taludes con geomallas a base a fibras naturales que contribuyen en la mejora de este; partiendo de que las fibras absorben de mejor manera el agua y controlan el transporte de material sobre el terreno.

Hernández et al. (2015) en su conferencia denominada implementación de fibras naturales en la estabilidad de Taludes se basan en la resolución 1083 del 04 de octubre de 1996. En los últimos años la búsqueda de la reducción de contaminación en las obras de ingeniería ordena el uso de fibras naturales, ya que estas generan un aporte ecológicamente positivo por ser biodegradables y al tiempo, le brindan nutrientes al suelo; de modo que, el crecimiento de la vegetación sea mayor para que se cree una capa vegetal que proteja al terreno de las gotas de lluvia y la escorrentía superficial para la disminución de la erosión ocasionada por el factor hídrico en estas estructuras inclinadas.

Adicionalmente, esta materia prima al ser catalogada como durable y resistente hace que se convierta en un material prominente con el pasar de los años en el sector de la construcción (Ray, 2016). Motivo por el cual, su implementación contribuye al desarrollo económico en las regiones productoras y en el sector de la ingeniería evalúa la eficiencia en la contención de terrenos como medida de mitigación de daños severos en sus capas superficiales, de tal forma que se garantice una óptima construcción, la cual se basa en estudios físico-mecánicos (resistencia a la tensión, rigidez, módulo de elasticidad y alargamiento) que den a conocer las características y condiciones reales del material. (Mejía y Gutiérrez, 2021)

Conjuntamente se hace necesario tener presente que todos los análisis están en función de la necesidad del terreno y zonas aledañas para facilitar la determinación de la viabilidad en el uso de estos biomantos independientemente de que sean permanentes o temporales; puesto que, aparte de los ensayo de laboratorio se pueden ejecutar algunas modelaciones a escala en las que se logre revisar las condiciones de riego y de factores ambientales que pueden influir y afectar directamente la estructura. (Caicedo y Ardila, 2017). Del mismo modo, al poner en marcha esta alternativa natural se imparten beneficios económicos como lo indica, Gómez, J. (2009); dado que, la reducción de costos es significativa al poseer fácil acceso a la fibra por su gran producción, sin dejar de lado que los métodos a emplear en cada zona de afectación deben ser acordes a factores pertenecientes netamente al lugar en el que se llevará a cabo la estructura de contención, (Vásquez, 2018) pero apoyados de dicha estrategia para contribuir en evitar la industrialización y uso masivo de plásticos que contaminan atmosféricamente y producen una considerable huella de carbono.

Por otro lado, es fundamental realizar investigaciones en las que se analicen las propiedades fisicoquímicas de la fibra; de manera que sea posible establecer la perspectiva adecuada de su utilización como refuerzo de matrices poliméricas en caso de que la fibra no tenga viabilidad al usarse individualmente. (Muñoz, 2014), dicha caracterización es posible por medio de tratamientos superficiales de la fibra como lo es la alcalinización, para este proceso se sumergen las fibras en una disolución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH), para luego ser pre-impregnadas en una disolución de polietileno y así finalmente, ser secadas para realizar la verificación que indique que se mejoran las propiedades del material mediante ensayos de laboratorio.

Como complemento, se enfatiza en que es necesario hacer una caracterización mecánica en laboratorio de ensayos como: Espectroscopia Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR), comportamiento térmico de las

fibras con el Análisis Termo Gravimétrico (TGA), medición del desempeño mecánico a tensión regido a lo exigido por la norma ASTM D3822-07, en la cual se evalúan las fibras en función de su longitud, y por último se determina el ángulo de contacto para conocer el grado de mojabilidad de las fibras tratadas y no tratadas previamente. Lo anterior, permite que las fibras naturales tengan un mayor campo de acción en la ingeniería, puesto que, en el área vial y geotécnica es posible su implementación con el tratamiento para reforzar matrices poliméricas.

En cuanto al reforzamiento de polímeros; se destaca que, la fibra de fique posee altos estándares en su comportamiento mecánico que mejoran la calidad y su campo de aplicación; puesto que, podría llegar a reemplazar materiales que no tengan una resistencia significativa ante el desgaste, corrosión, amortiguación, aislamiento, entre otros, generando aportes a las obras civiles y reduciendo costos e impactos ambientales negativos. (Rua et al., 2021) Paralelo a esto, Ochoa et al. (2011), hacen hincapié en la importancia de los biomantos de fibra natural, no solo para que contribuyan en la recuperación del suelo erosionado por factores antrópicos o naturales, sino por la recuperación de la flora regional como un parámetro que permita aumentar la adhesión del material (talud-suelo) como método de estabilización en dichas áreas para aportar resistencia al terreno.

Para el control de erosión se han generado métodos complementarios a la revegetalización, hidrosiembra y paisajismo de taludes como procesos para llegar a obtener una vegetación permanente; puesto que el fique, mantiene la humedad del suelo y aporta sustratos orgánicos (Suárez, 2019). A pesar de ello, en algunos países como Brasil, la utilización del sisal debe ir acompañada de otras fibras como la de coco para que se ayude de sobremanera en la recuperación del suelo. Como contribución innovadora enfocada en este primer material se resalta que este actúa no solo como fibra, sino que también en presentación molida como lo evidencia, Pacheco (2016) mostrando resultados factibles

en cuanto a la protección de la vegetación a través de biomantos de fibra de sisal y del sisal molido sobre el suelo.

Respecto a otras investigaciones en el sector geotécnico, el ya mencionado material no solo se ha implementado en el área de la estabilidad de taludes, ya que se ha evidenciado en presentaciones como la ceniza de fique acompañado de óxido de calcio como materiales que contribuyen en la optimización de suelos principalmente finos, de tal manera que la compactación del suelo permita aumentar la capacidad portante y la resistencia del mismo, adicional a la reducción de su plasticidad (Taype y Vega, 2020). De igual forma, García y Romero (2019), han hecho estudios de la actividad de estabilización del terreno en vías no pavimentadas, al unir la fibra de fique con el suelo, como método para optimizar la subrasante y mejorar el CBR, a partir de ensayos con adiciones o sin adiciones de cemento; dado que, es necesario tener en cuenta el tipo de suelo, que para el caso de estudio corresponde a uno arcillosos, por lo cual es difícil que se mezcle homogéneamente con la fibra y se requiere de un material adicional que puede elevar los costos de obra.

Luna y Quispe (2021) adicionan que tras realizar ensayos con muestras de este tipo de suelos no es oportuno hacer uso de esta fibra porque disminuye el valor de CBR, además que al tratar la fibra con óxido de calcio para mejorar sus propiedades no aumentan ni disminuyen la permeabilidad del suelo, ni logra establecer porcentajes de humedad óptimos, motivos por los cuales no se recomienda usarla en la estabilización de subrasantes. Mas, Aguirre y Valencia (2020), mencionan que la fibra de fique influye positivamente en el mejoramiento de la calidad de los suelos finos no arcillosos; al realizar laboratorios de análisis de suelos como límites de Atterberg y granulometría. Con respecto a las fibras naturales, se basaron en añadirlas a probetas de cilindros y vigas con concreto mediante ensayos de compresión confinada, de los cuales se resaltó el mejoramiento de suelos finos, adicional al aumento de resistencia a

la compresión, pues se mejoraron las propiedades mecánicas al compararlas con y sin refuerzo indicando que las fibras naturales si refuerzan adecuadamente.

Por otro lado, otras investigaciones consisten en buscar sostenibilidad al hacer de la fibra un aditivo del concreto para controlar el agrietamiento de este y así mismo mejorar sus propiedades (Moya, 2021). De la misma manera Okeola et al. (2018), agregan que el uso de fibra de sisal reduce la compresión, pero a su vez detiene la propagación de grietas de modo que se reduzca la relación de Poisson en vigas y cilindros. También, es de enfatizar que el hecho de implementar las diferentes fibras naturales ayuda a la construcción sostenible y al impacto ambiental.

Rodríguez y Díaz (2019) caracterizan la fibra de fique como una alternativa de sostenibilidad y reducciones económicas del pavimento hidráulico, basados en normas como la INVIAS y NTC en pruebas de laboratorio para el caso de Colombia, puesto que determinan factores como la compresión y flexión del concreto con cierto porcentaje de adición de la fibra, para obtener como resultado que se puede aplicar en losas debido a las fibras que actúan de mejor manera a compresión. Del mismo modo, Chopra y Razahi (2020), dicen que el asfalto de matriz de piedra (SMA) con la fibra de sisal en mezclas de asfalto reduce la estabilidad.

Por otra parte, el uso de la fibra de fique como aditivo de concreto ha sido analizado para medir sus propiedades mecánicas como lo indica Alegre (2018), a través de crear comparaciones de la mezcla común de concreto y la mezcla con adición de fibra de agave recubierto con parafina; dado que esta, es una materia prima con gran expansión en países subdesarrollados como Perú, razón por la que, se adquiere con gran facilidad, pero el tratamiento con parafina se da porque la absorción de agua en las fibras puede variar sus dimensiones; por lo tanto, se genera una contracción en la fibra cuando se endurece el concreto lo cual, podría disminuir la adherencia

entre materiales aunque las fibras posean propiedades físico-mecánicas representativas, como resistencia última a tensión.

Como complemento, Quico y Quico (2019), identificaron que, por medio de un tratamiento químico y uso a compresión de los elementos a base de concreto, estos tendrán un funcionamiento con mayor resistencia que si no tuviese un tratamiento, ya que en presencia de medios alcalinos se genera una notable reducción de la resistencia mecánica y tenacidad de los compuestos para hacer una adecuada contribución ingenieril sostenible (Coudert, 2019; Soto y Ramalho, 2014).

Asimismo, Saavedra y Ortega (2021,) al realizar un análisis añaden que es importante realizar una modelación digital para monitorear el comportamiento de las fibras al adicionarlas en diferentes cantidades, con lo cual se obtuvo que a flexión no resulta ser muy eficiente el concreto con la adición de fibra, pero a compresión sí.

Al hablar de concreto, se amplía el modo de utilización en la ingeniería no solo geotécnica sino también estructural, debido a que se ha investigado acerca la implementación de fique en muros sólidos de hormigón vaciado in situ y en la construcción de viviendas de interés social ya que, se disminuye el costo de obra y se puede producir sin perder calidad como lo indica Silva et al. (2019).

Bonilla (2017), argumenta que el desarrollo de materiales hechos a partir de una matriz de cemento portland y fibra de fique al compararla con otras fibras posee mayor resistencia que la fibra de vidrio, pero que al tratarla con el hidrofóbico never wet la resistencia se prolonga, por lo que se ha tratado de aplicarla en el sector de la construcción en elementos no estructurales como un compuesto reforzante para poseer mejores resultados.

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la investigación inicialmente se desarrolla una exhaustiva revisión bibliográfica de tópicos relacionados con el uso de la fibra natural de fique en la ingeniería civil, a través de la búsqueda de información en distintas bases de datos, entre estas se destacan scielo, Google académico y science-direct, así como repositorios de universidades nacionales e internacionales. Dicha búsqueda se realizó mediante operadores booleanos como O, OR, AND, NOT, WITH y 6W principalmente, que acompañados de palabras claves como lo son fibra, fique, estabilización, taludes, revegetación, entre otras.

A partir de la revisión anteriormente mencionada, se tuvieron en cuenta artículos relacionados con el adicionamiento de aditivos al concreto, estabilización de taludes y la utilización de esta fibra en diferentes países, lo cual permitirá analizar, evaluar y concluir la mejor alternativa para la utilización de esta fibra en especial en la estabilidad de taludes.

3. RESULTADOS

A partir de la revisión anteriormente mencionada, se tuvieron en cuenta artículos relacionados con el adicionamiento de aditivos al concreto, estabilización de taludes y la utilización de esta fibra en diferentes países, lo cual permitirá analizar, evaluar y concluir la mejor alternativa para la utilización de esta fibra en especial en la estabilidad de taludes. Dentro del desarrollo del presente artículo, se van a tener en cuenta distintas características de la fibra de fique, que involucra aspectos tales como: la disminución en la huella de carbono tras la sustitución de polímeros en la composición de geotextiles, que evalúen la contaminación ambiental actual generada por productos sintéticos que son desechados y la complejidad que se tiene para que puedan ser biodegradados.

Para la caracterización del fique, se establece la factibilidad y resistencia que posee esta fibra natural ante su posible uso como materia prima en la fabricación de geotextiles a futuro, lográndose medir cuantitativamente mediante la realización de distintos ensayos de laboratorio, además se logra comparar el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas de la fibra tras algunos tratamientos químicos verificados por distintos autores.

3.1 Fibras naturales como aditivos en el concreto

En los últimos años, se han reflejado avances tecnológicos en los diferentes materiales de construcción, debido a que se incluyen aditivos que permiten tener mayor calidad de las distintas propiedades del hormigón independientemente de su estado; el jugo del fique es uno de estos avances; ya que, su composición consiste en materia orgánica comprendida por sacarosa, proteínas, esteroides y saponinas, que se comportan como tensioactivos que son responsables del intervenir con el aire en los morteros y hormigones (Zapata, 2009).

Sin embargo, los aditivos utilizados actualmente en mezclas de hormigones y morteros son sintéticos, pero a través del tiempo se ha estudiado la adición de diferentes fibras de origen natural y vegetal, de esta forma es como el jugo del fique hace presencia en los nuevos estudios y se usa como un reforzante, pues durante el proceso de elaboración del hormigón, se forman poros que disminuyen la densidad de la mezcla y mejoran la durabilidad del hormigón ante los procesos físicos y químicos (Ochoa, J et al, 2007).

3.2 Estabilización de taludes con geomantos

Es importante destacar el uso y la innovación de materiales ecológicos que son implementados para las diferentes construcciones y la recuperación del medio ambiente. Los métodos de estabilización de taludes normalmente son enfocados en la reducción de fuerzas actuantes, incrementar fuerzas resistentes

o la combinación de ellas, para lograr esto, se debe hacer una excavación para extraer material, lo cual permite evaluar y desarrollar diferentes ensayos que permitan seleccionar cuál es el mejor método de estabilidad, ya que este depende de limitaciones técnicas como lo son: ubicación, factores económicos, tipo de suelo, entre otros.

La utilización de fibras naturales como lo son el cáñamo, coco, lino, son producidas naturalmente y caracterizadas por ser biodegradables, renovables, sostenibles y económicas (Hernández et al, 2015). Las tecnologías utilizadas para controlar la erosión se apoyan en la bioingeniería, más específicamente con materiales como pastos, vetiver, bambú o guadua; se tiene presente que para el desarrollo de obras de manejo de agua superficial se debe colocar una revegetalización con tela elaborada a partir de fibra de fique en vista de que, esta presenta propiedades absorbentes que ayudan a disminuir la erosión en los diferentes terrenos (Díaz Mendoza, 2011).

3.3 Contaminación por uso de geotextiles a base de materiales sintéticos

Actualmente, los productos a base de polímeros son consumidos y desechados en grandes volúmenes en todo el mundo, lo cual produce un daño notorio y genera un desequilibrio en el medio ambiente, perjudicando tanto a especies terrestres como a especies marinas, esto debido a que los polímeros se encuentran disponibles en una gran inmensidad de productos que se fabrican minuto a minuto por enormes industrias, como por ejemplo: las botellas plásticas que están elaboradas a base de Polietileno Tereftalato (PET), los distintos

usos del cloruro de polivinilo (PVC) empleados comúnmente en el sector de la construcción como en tuberías, revestimientos, techos, cubiertas, etc.

Otro elemento es el polipropileno (PP) también producido en enormes cantidades, este se encuentra disponible en empaques de alimentos, componentes de automóviles, tejidos, etc., el polipropileno además, es usado en la fabricación de geotextiles, por lo cual tiene la función de actuar como refuerzo en taludes, así como la prevención y control de la erosión, ya que es un material altamente resistente que tiene un buen rendimiento y presenta una gran durabilidad para su aplicación en este tipo de obras.

Para todos estos productos la demanda aumenta cada año y no se prevén alternativas para dar solución ante el daño provocado al medio ambiente producido por las enormes toneladas de desechos que se generan al año de materiales derivados de los polímeros.

En un contexto global, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha establecido que se producen más de 200 millones de toneladas de desechos plásticos, de las cuales más de 11 millones de toneladas llegan a los océanos, afectando enormemente a las especies marinas del planeta; Un claro ejemplo de esta problemática de desechos de productos a base de polímeros en el mundo, es el caso de la contaminación por materiales geosintéticos producida en la costa Sudoriental del Báltico (Rusia), la cual se generó a partir de la destrucción de las estructuras de protección costera en el año 2018.

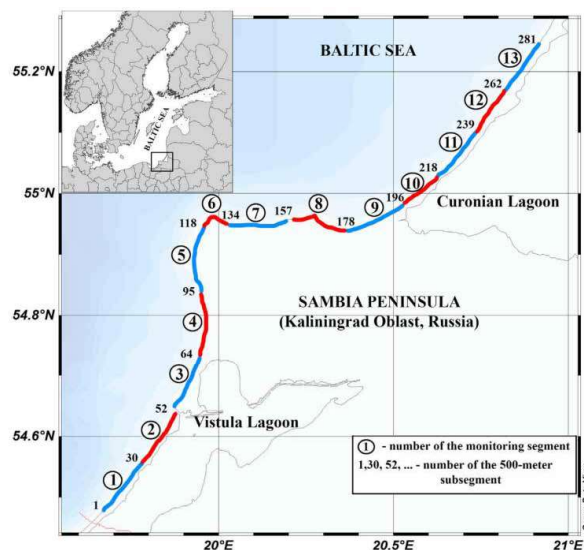


Figura 1. Diseño del campo de seguimiento en el báltico sudoriental.

Fuente: Chubarenkoa et ál. (2022).

Tras la destrucción de las estructuras de protección a los suelos costeros, se generó una gran contaminación en las aguas marinas y playas ubicadas a aproximadamente 1 km del lugar donde sucedieron los hechos, en la cual se encontraron grandes contenidos de restos de material geosintético, así como geomallas y geoceldas, afectando enormemente el ecosistema en la costa del Óblast de Kaliningrado en Rusia (Chubarenkoa et al., 2022).

La problemática radica en gran medida, en que estos compuestos arrojados al mar no son biodegradables, y por lo tanto la única forma de mitigar esta afectación al medio ambiente, es realizando jornadas de limpieza profundas en la zona afectada, para recolectar la mayor cantidad de desechos lo cual es casi imposible lograr obtener el 100 % de estos materiales disueltos en el mar. Por el contrario, si se emplearan geomantos a base de fibras naturales en estas obras cercanas a ecosistemas tan frágiles, se mitigaría en gran medida todo lo referente a daños ambientales, provocados por estas nuevas alternativas para el reforzamiento de suelos y control de erosión. Según Yao Z et al, (2022), la producción de polímeros en el mundo se distribuye de la siguiente manera:

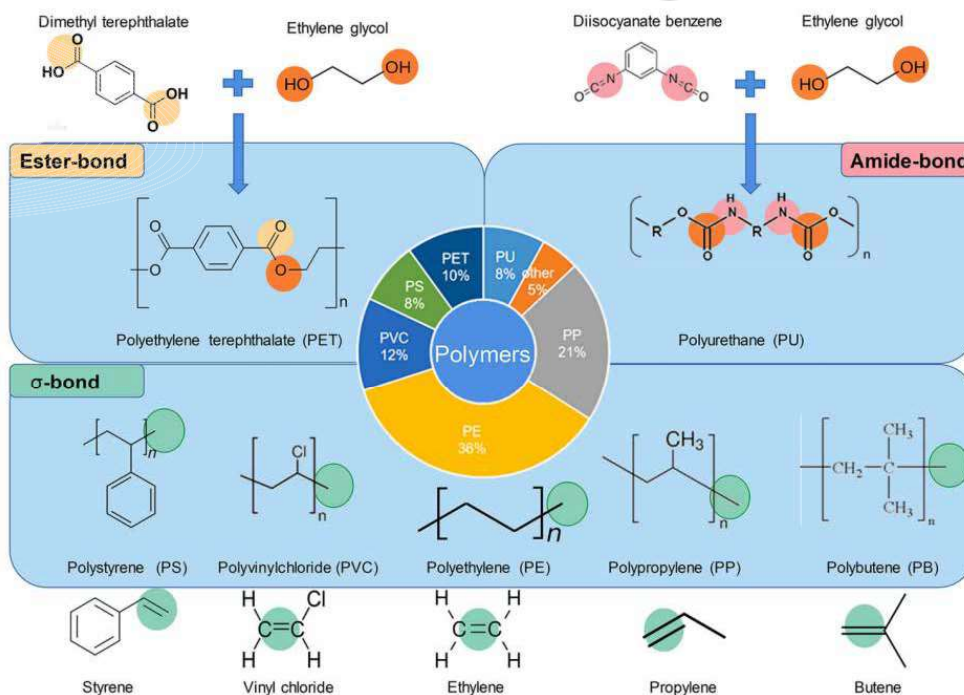


Figura 2. Los tipos de plástico más utilizados, su cuota de mercado y clasificación en función de la estructura química principal.

Fuente: Yao Z et al. (2022)

Como se puede evidenciar en el diagrama anterior, respecto a los productos derivados de los polímeros, en primer lugar, se encuentra el polietileno (PE) con un 38 % de participación en base a un análisis de su cuota de mercado, siendo el plástico más utilizado en pleno siglo XXI. El polietileno está compuesto por un 97.5 % de polímero y el 2.5 % faltante corresponde a antioxidantes, y estabilizadores de calor que hacen que la geomembrana sea más resistente a afectaciones climáticas como los rayos UV.

El polietileno tiene un gran uso en el campo de la ingeniería, ya que es empleado en embalses, represas, plantas de tratamiento de aguas, túneles, rellenos sanitarios, etc., se destaca también dentro de la investigación el polietileno de alta y baja densidad texturizadas (HDPE TXT) (LLDPE TXT), el cual se dispone en taludes ya que incrementa el ángulo de fricción entre ambas superficies que ayudan a estabilizar el material. Otro polímero usado en gran medida según la Figura 2, es el polipropileno (PP), con un porcentaje del 21 % respecto a otros polímeros solicitados por necesidades industriales, seguido del policloruro de vinilo (PVC) con una participación del 12 %. Estos elementos debido a sus excelentes resistencias mecánicas, químicas y flexibles son empleados como módulos de geomembranas sintéticas, tanques de agua potable, cubiertas arquitectónicas, entre otras (Geo Andes, 2019).

Todos estos polímeros están compuestos por energías no renovables y contaminantes como el petróleo y el carbón (Ray y Cooney, 2018). Cuando acaba la vida útil de todos estos elementos son desechados en enormes volúmenes y dispuestos de manera equivocada, siendo insostenible ambientalmente y colocando en peligro la salud de las personas. Al tratarse de compuestos sintéticos no son biodegradables, por lo tanto, la única manera de eliminarlos y que se ha venido realizando en los últimos años es mediante la incineración, lo que provoca aún más daños al medio ambiente.

3.4 Uso del fique a nivel nacional

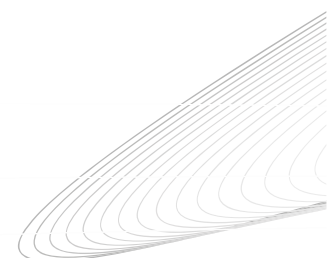
Dentro del contexto nacional, el departamento que históricamente ha suministrado la mayor producción del fique es el Cauca, ya que para el año 2013 se comercializaron 7.338 Toneladas, con un porcentaje de participación del 40 %, seguido del departamento de Nariño con un 37 % y en tercer lugar se encuentra Antioquia con el 13 %. La mayor obtención del fique se concentra principalmente en estos dos departamentos debido a que gran parte de la población indígena se encuentra organizada en estas zonas, las cuales se dedican a su extracción para la fabricación de artesanías y diversos productos (Echeverry et al., 2013).

Tabla 1. Zonas de producción de cabuya y porcentaje de participación por departamento.

Departamento	Toneladas año	Porcentaje (%)
Cauca	7.338	40
Nariño	6.724	37
Antioquia	2.309	13
Santander	1.678	9
Caldas	141	1 (entre los departamentos de Caldas, Boyacá, Risaralda y Norte de Santander)
Boyacá	87	
Risaralda	40	
Norte de Santander	9	
Total	18.326	100

Fuente: Echeverry et al. (2013).

Como se puede evidenciar en la Tabla 1, Boyacá se encuentra muy por debajo en lo referente a la producción del fique respecto a los demás departamentos, al ser este el departamento más cercano para la recolección de información se enfatiza en que, la gobernación de Boyacá para el año 2017, ha optado por realizar algunas medidas, con el fin de incentivar la diversificación y potenciar la producción de algunos productos, en el cual dentro de las cadenas productivas se encuentra el fique.



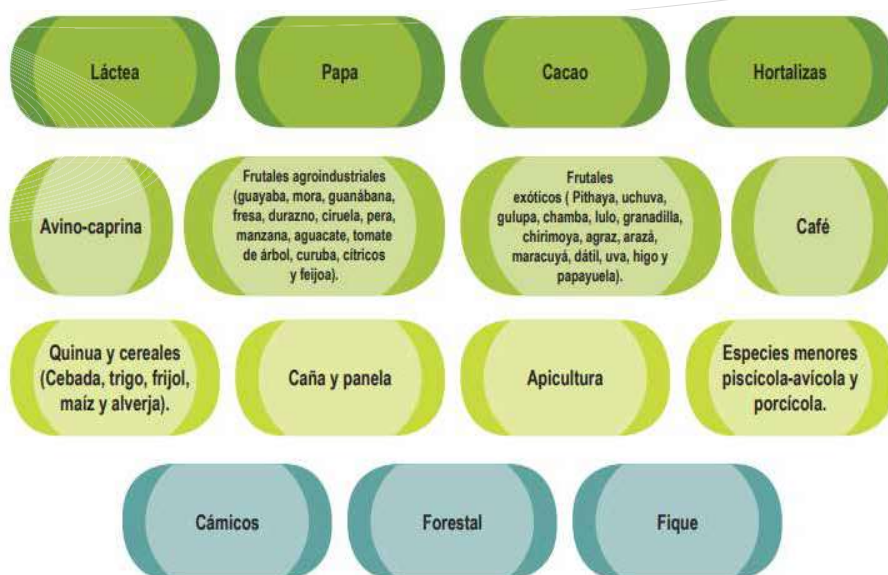


Figura 3. Cadenas productivas priorizadas.

Fuente: Gobernación de Boyacá, (2017).

Es importante tener en cuenta el interés de la Gobernación de Boyacá en la producción del fique, ya que contribuye directamente a la comunidad, ofreciendo una mayor oportunidad de empleo, en donde al diversificarse el uso de este elemento natural se expande directamente su mercado. Uno de los potenciales de uso especificado por la Gobernación para el fique es la de que se logre sustituir este elemento con las fibras sintéticas para la producción de geotextiles (Gobernación de Boyacá, 2018).

Tabla 2. Estado actual y perspectivas de futuro de las cadenas productivas en el departamento.

<i>Fique</i>	
Estado actual	Potencialidad
Se siembra como cerca viva y control de potreros	Elaboración de artesanías de trenza, alpargatas, fibras, entre otros.
Solo se aprovecha el 4 % fibra	Se debe reactivar como cultivo comercial
Bagazo, se puede utilizar la orellana para fortalecer la seguridad alimentaria	Las fibras sintéticas han desplazado el cultivo
Con los jugos se obtienen sopotinas, funguicidas y plaguicidas, así como ecogénicas que son base para medicamentos y otros derivados.	Potencial para producción de geotextiles, retención de suelos, fibras, entre otros.
1600 productores que cuentan con plantas de fique que actúan como linderos	Uso de fibra natural que reemplace fibras sintéticas

Fuente: Gobernación de Boyacá (2018).

3.5 Características físico-mecánicas de la fibra de fique

En base a la revisión bibliográfica, se han tomado en cuenta diversos estudios encaminados a la búsqueda y observación del comportamiento físico-mecánico que posee la fibra de fique mediante procesos experimentales con distintos ensayos en laboratorio, esto con la finalidad de lograr determinar de una manera mucho más exacta y analítica, la viabilidad que se tiene al sustituir esta fibra natural con los materiales sintéticos mayormente fabricados a base de polímeros actualmente.

Dentro de los ensayos encontrados principalmente en la base de datos para la búsqueda de elementos científicos en Sciencedirect, los distintos autores han elaborado especialmente el ensayo a tensión en las fibras de fique para lograr establecer las propiedades mecánicas y físicas de dicho elemento, por ejemplo: el módulo de elasticidad, esfuerzo máximo soportado por la fibra, deformación y alargamiento, resistencia a la tracción, etc., en los cuales la variable es el proceso de tratamiento superficial realizado dentro de la composición de las fibras de fique por cada autor al emplearse distintos elementos químicos para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas en los que se espera una mayor resistencia de este elemento natural.

En primer lugar, en base a los artículos de revisión bibliográfica consultados, se estudia la metodología empleada por (Barandaoa et ál., 2017), los cuales buscan generar un biocompuesto sostenible con el medio ambiente y que sea posible sustituir este elemento con la fibra de vidrio, e incluso con algunas aleaciones de aluminio. Para determinar los parámetros de resistencia como módulo de elasticidad de la fibra de fique y obtener el diagrama de esfuerzo vs deformación del material, se emplearon ensayos a tracción realizadas de acuerdo con la norma ASTM D3822 / D3822M – 14 en el cual se utilizó una máquina de ensayo universal MTS 810. Para la caracterización de la fibra de fique (Barandaoa et al., 2017), consideraron tres (3) tipos de muestras de la siguiente manera: (a) Biocompuestos aleatorios de fibra corta (RSF), (b) Biocompuestos aleatorios de fibra discontinua (RDF), (c) Biocompuestos Unidireccionales de Fibra Larga (ULF):

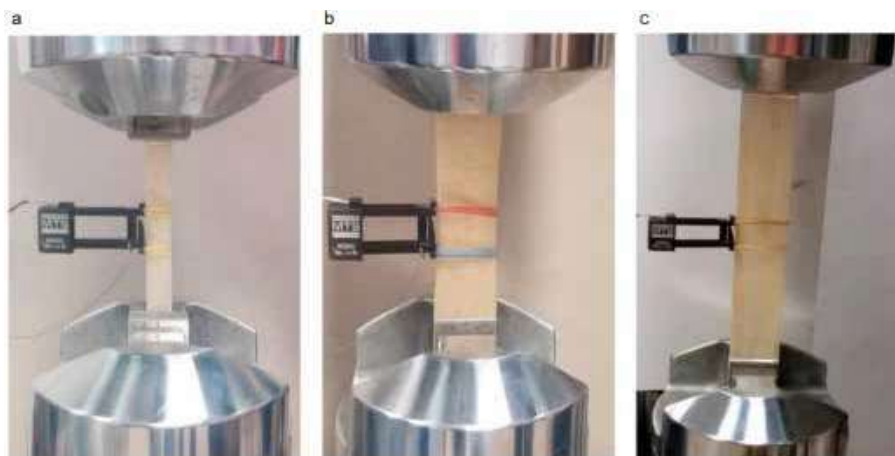


Figura 4. Ensayo a tracción para muestras (rsf), (rdf), (ulf).

Fuente: Barandaoa et al. (2017).

A partir del ensayo a tracción para cada una de las muestras de fibra de fique, se estableció que los compuestos unidireccionales de fibra larga (ULF) presentan un mejor comportamiento mecánico al de los compuestos de fibras cortas (RSF) y discontinuas (RDF), ya que, los resultados de la

resistencia última a tracción en promedio fueron de 215 MPa, 68 MPa y 50 MPa respectivamente, a continuación, se muestra el comportamiento para cada una de las probetas tipo (ULF) sometidas al ensayo de tracción:

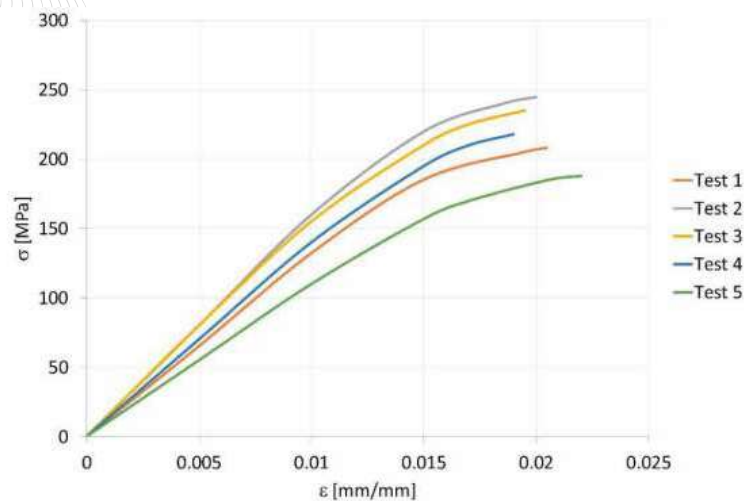


Figura 5. Curvas de tracción para (bio) compósitos de fibra larga unidireccional (ufl).

Fuente: Barandaoa et al. (2017)

Para la gráfica de esfuerzo vs deformación se puede identificar que el comportamiento de la fibra de fique sometida a tracción es elástico siendo casi lineal, con una rigidez que es progresivamente creciente hasta la zona en la cual se produce proceso de falla, además (Barandaoa et ál.,2017) establecieron que en este caso el módulo de Young longitudinal es de aproximadamente 15 GPa para este compuesto unidireccional de fibras largas (ULF). Esta diferencia notoria de resistencia a la tracción de las fibras de fique, se debe en gran medida a que la composición unidireccional de fibra larga (c), se desarrolló con un alineamiento transversal y longitudinal de la fibra con una presión de moldeo de 15 MPa para obtener una muestra con una buena compactación, hay que tener en cuenta que los moldes utilizados presentan dimensiones de 200 mm x 350 mm, y debido a este alineamiento de las fibras el espesor es más alto ya que posee una mayor concentración de volumen de las fibras (Barandaoa et ál.,2017).



Figura 6. Tejido de las fibras de fique (rsf), (rdf), (ulf).

Fuente: Barandaoa et ál. (2017).

En lo referente la elaboración de los tres tejidos laminados en los moldes de la fibra de fique, se desarrollaron realizando una mezcla entre la matriz epoxi verde y la fibra vegetal, la cual es una matriz ecológica que presenta propiedades mecánicas comparable a una resina obtenida a partir de petroquímicos, con lo cual se reduciría entonces mayormente la huella de carbono al implementarse estos nuevos materiales en el sector de la ingeniería.

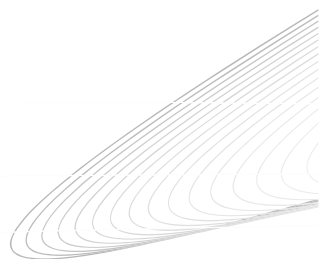
Por otro lado, Gómez (2009) se encargó de realizar ensayos de laboratorio a distintas fibras de origen natural (coco, bagazo de caña y de fique) siguiendo lo exigido por la normativa ASTM C1557-03, en el cual se especifica la metodología a seguir para la realización del ensayo a tensión de dichas fibras.



Figura 7. Montaje de las fibras en la máquina de tensión.

Fuente: Gómez (2009).

Según el autor, este ensayo se ejecutó a una temperatura de 25°C con una humedad relativa del 50 %, aplicándose un torque de 20 N/m. En este caso se estudiaron los comportamientos de las fibras tratadas y no tratadas químicamente, según (Dipa y Sarkar, 2000), es viable someter las fibras vegetales a soluciones alcalinas como el NaOH (hidróxido de sodio), las cuales pueden mejorar algunas de sus características, obteniéndose una mayor compatibilidad entre las fibras que componen el elemento.



A. Modulo de elasticidad (MPa)

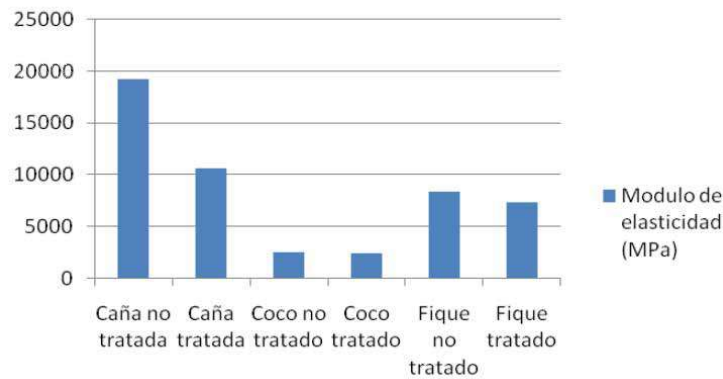


Figura 8. Módulo de elasticidad de las fibras naturales.

Fuente: Gómez (2009).

En la Figura 8 se observan los resultados obtenidos del módulo de elasticidad de las fibras vegetales, esto nos ayuda a identificar que tanta rigidez poseen los materiales. En este caso se observa que la fibra de caña no tratada posee el mayor módulo de elasticidad respecto a las otras fibras, con un valor de aproximadamente 19200 MPa, Luego se encuentra la fibra de caña tratada con (NaOH) en la cual el módulo de elasticidad obtenido es de 10500 MPa, disminuyendo su rigidez en un 45 %.

Este comportamiento de descenso del módulo de elasticidad en las fibras naturales también se logra evidenciar en la fibra de fique y de coco, las cuales poseen valores de 8000 MPa y 2500 MPa respectivamente, se puede evidenciar entonces, que al emplearse esta solución alcalina (NaOH) afecta enormemente el comportamiento mecánico de estos elementos. Por lo tanto, se redujo la concentración de esta solución del 5 % a una aplicación del 2 % sumergiéndose las fibras durante un tiempo de 4 horas, con la finalidad de mejorar sus propiedades.

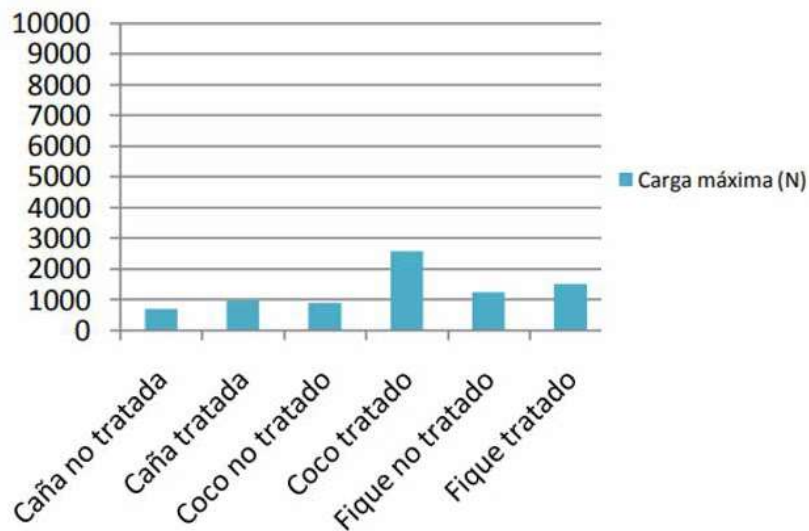


Figura 9. Esfuerzo máximo soportado por las fibras.

Fuente: Gómez (2009).

Como se puede evidenciar en la Figura 9, las fibras tratadas con NaOH poseen una mayor resistencia ante la aplicación de cargas, en las que se destaca la fibra de coco tratada en la cual la carga máxima soportada es de 2600 N, también, se encuentra con un buen comportamiento mecánico la fibra de fique con un esfuerzo máximo soportado de 1500 N, por último, la fibra de caña tratada con una carga máxima de 1000 N, esto debido en mayor parte en que el bagazo de caña es un material mucho más rígido y por lo tanto frágil ante la aplicación de esfuerzos. Por otro lado, las fibras de coco y fique presentan este comportamiento debido a que son elementos mucho más flexibles y manipulables (Gómez, 2009).

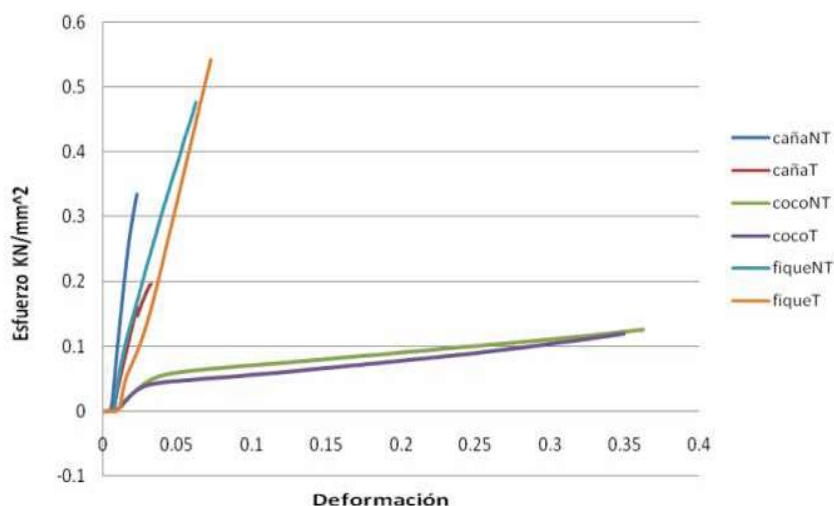


Figura 10. Esfuerzo vs deformación unitaria de las fibras.

Fuente: Gómez (2009).

Respecto a la gráfica de esfuerzo vs deformación (Figura 10), se puede evidenciar que la fibra de fique tratada denotada de color naranja, posee una mayor resistencia ante la aplicación de esfuerzos presentando una baja deformación en su estructura, esto quiere decir que dicho elemento es capaz de cubrir valores más altos de deformación (KN/mm^2) y valores de deformación más bajos que las otras fibras vegetales (coco y bagazo de caña). La fibra de coco presenta baja resistencia ante la aplicación de esfuerzos y es un elemento natural altamente deformable.

En tercer lugar, Luna et ál. (2017) proponen el uso de plasma de grabado seco dentro de la matriz de fibra de fique. Los autores emplearon distintos tiempos de exposición para lograr identificar el lapso adecuado del tratamiento con plasma, con la finalidad de mejorar las irregularidades que presenta la superficie de la fibra, esto sin que se afecte la resistencia de este material, a continuación, se muestra el estado de las fibras mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM) para: a) 0 segundos, b) 200 segundos, c) 400 segundos, d) 600 segundos, e) 800 segundos, f) 1000 segundos y g) 1200 segundos.

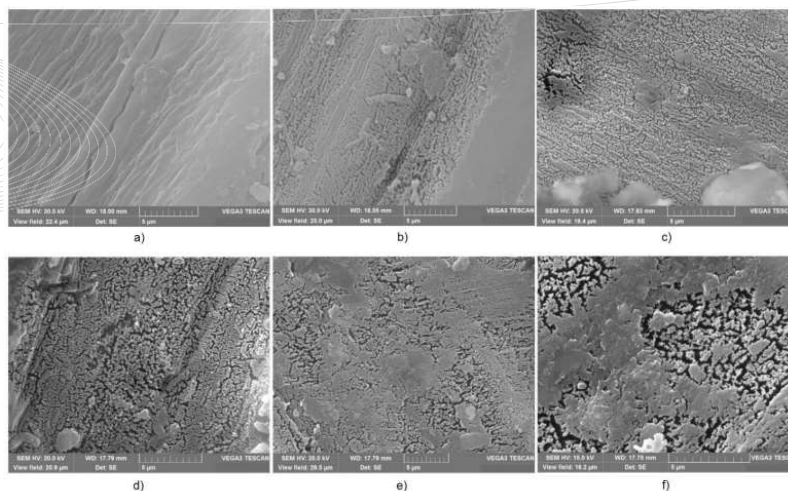


Figura 11. Micrografías sem de la fibra de fique.

Fuente: Luna et al. (2017)

Con las micrografías (SEM), se puede observar que a medida que aumenta el tiempo de exposición de las fibras con el plasma de grabado seco, la superficie de la fibra se va tornando más gruesa y rugosa como sucede a un tiempo de tratamiento de 1000 segundos (e) y 1200 segundos (f), lo que permite una mejor unión de la matriz del material vegetal, esto se debe principalmente a que al aplicarse el plasma de grabado seco causa un bombardeo de iones en la superficie de las fibras (Amirou et ál., 2013).

Dentro de esta investigación, se pudo comprobar la importancia de realizar tratamientos de carácter químico a la superficie de esta fibra, ya que, al tratarse de un producto totalmente natural, su superficie presenta demasiadas irregularidades que hacen que no se tenga una buena adherencia entre las fibras y por lo tanto las propiedades de resistencia del material disminuyen considerablemente. Principalmente estos elementos naturales están compuestos por celulosa, con el cual se difiere un comportamiento hidrofílico generado por reacciones químicas que hacen que exista una incompatibilidad química entre la fibra, teniendo entonces un mal rendimiento a las tensiones a las que estará sometido el material (Pickering y Efendy, 2015). De acuerdo con la norma ASTM 1557-14 (Luna et ál., 2017), luego del tratamiento con plasma a la fibra de fique, se encargaron de someter 5 muestras para cada uno de los periodos (0 seg, 200 seg, 400 seg, 600 seg, 800 seg, 1000 seg y 1200 seg) al ensayo de resistencia a la tracción, en el cual, para un análisis más detallado de la existencia de una mejora en la resistencia de la fibra, los autores promediaron los resultados para cada uno de los tiempos establecidos para el ensayo.

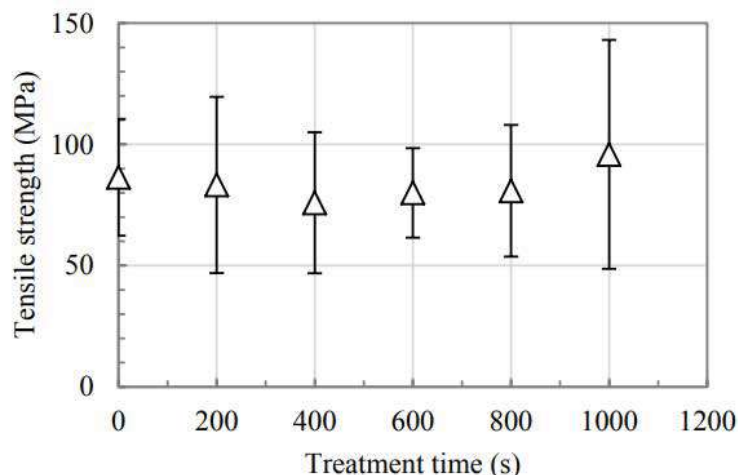


Figura 12. Resistencia a la tracción de la fibra de fique

Fuente: luna et ál. (2017)

Como se puede observar, inicialmente la fibra de fique al no estar sometida a un tratamiento superficial posee una resistencia a la tracción aceptable (entre 50 MPa y 110 MPa), por otro lado, para los tiempos de tratamiento de la fibra de fique con plasma entre 200 segundos y 800 segundos presentan un comportamiento similar, con una resistencia a la tracción de las distintas muestras presentando una resistencia a la tracción entre un rango de 50 MPa y un valor máximo de 120 MPa. Por último, se puede corroborar que el tratamiento con plasma es útil al emplearse para el tratamiento de esta fibra natural, ya que aumenta la resistencia de la fibra al generarse una estructura más gruesa y rugosa en su superficie, un material vegetal que alcanza una resistencia a la tracción de hasta 140 MPa gracias a este tratamiento.

Otra metodología desarrollada para investigar el comportamiento físico-mecánico de la fibra de fique es la empleada por (Sathiamurthi et ál., 2021), en el cual, se basaron en un proceso de moldeo por compresión entre la fibra de fique y una resina epoxi con endurecedor, con esto crearon compuestos híbridos que luego se sometieron a los ensayos de tracción de acuerdo con la norma ASTM D638 en la máquina universal y el ensayo a compresión siguiendo lo establecido por la norma ASTM D790-10.



Figura 13. Muestras fracturadas a) muestras de tracción y b) muestras de flexión.

Fuente: Sathiamurthi et ál. (2021)

Para el análisis adecuado de las propiedades de resistencia de las fibras de fique, los autores mezclaron en cuatro fracciones de peso relativo denominado (Wf), en porcentajes de 10 %, 15 %, 20 % y 25 % de resina aplicada al molde en conjunto con la fibra vegetal, además se realizó una variación de la longitud de las fibras para cada híbrido entre fibra y la resina epoxi, a continuación se muestran los resultados obtenidos por los autores respecto al ensayo de tracción para a) 1 cm, b) 2 cm, c) 3cm, d) 4 cm:

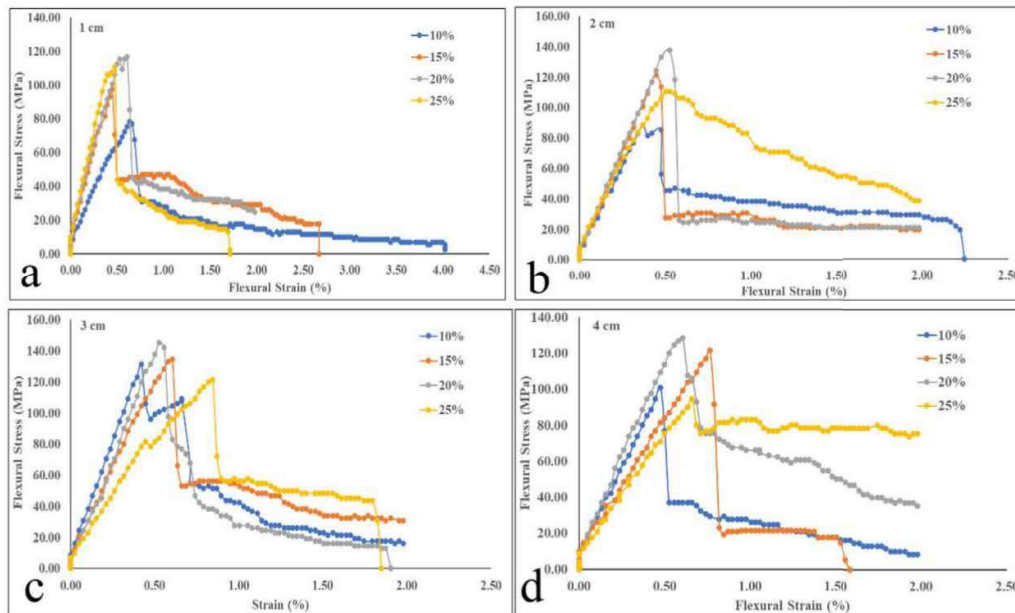


Figura 14. Curvas de esfuerzo de tracción versus deformación de compuestos híbridos.

Fuente: Sathiamurthi et al. (2021)

Respecto a las curvas de esfuerzo de tracción vs deformación de los compuestos, los autores lograron identificar que aumenta la resistencia del material al implementar un 20 % de resina epoxi dentro de la fabricación de cada compuesto. Además, se verifica que, al prolongar la longitud de las fibras, la resistencia la tracción es superior en los cuales se obtienen valores que oscila los 140 MPa para las longitudes de 3 cm y 4 cm de la fibra, y con las extensiones de 1cm y 2 cm esta resistencia está alrededor de los 120 MPa. Con esto los autores lograron identificar de que cuando menor sea la longitud, se disminuirá el módulo de tracción de la fibra de fique debido a la facilidad de extracción de las fibras de la matriz. Por último, como se pudo observar anteriormente, existe una gran variedad respecto a las metodologías adoptadas para mejoramiento del comportamiento físico-mecánicas de fibras vegetales en distintas partes del mundo, ya que resulta una alternativa en gran medida sustentable y sostenible con el medio ambiente y que son productos de bajo costo, en el cual resulta importante a día de hoy implementar nuevos materiales de carácter biodegradables para promover una ingeniería que resulte amigable con la naturaleza, cuidando de manera adecuada los distintos ecosistemas.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Luego de realizar una revisión de distintas alternativas de tratamiento superficial y químico de la fibra de fique, se puede identificar que algunas metodologías resultan más efectivas que otras, esto debido a que se puede analizar de manera cuantitativa las características de resistencia de este material vegetal mediante la elaboración de ensayos en laboratorio.

Con esta información recolectada por diversos autores, es posible comparar las propiedades físico-mecánicas del fique con las de productos derivados de polímeros como el polietileno y/o polipropileno, ya que son la materia prima hoy en día más utilizada para la fabricación de geomantos para el control de erosión en taludes, que resultan elementos que poseen una alta huella de carbono y que no son biodegradables, se acumulan año a año millones de toneladas de materiales derivados de polímeros en todo el mundo, lo que genera grandes consecuencias de contaminación ambiental. Dentro de la comparación de los métodos de tratamiento de la fibra de fique, en primer lugar, se va a analizar el módulo de elasticidad obtenido por los distintos autores mediante los respectivos ensayos de laboratorio, en el cual se resumen los resultados obtenidos en la siguiente gráfica:

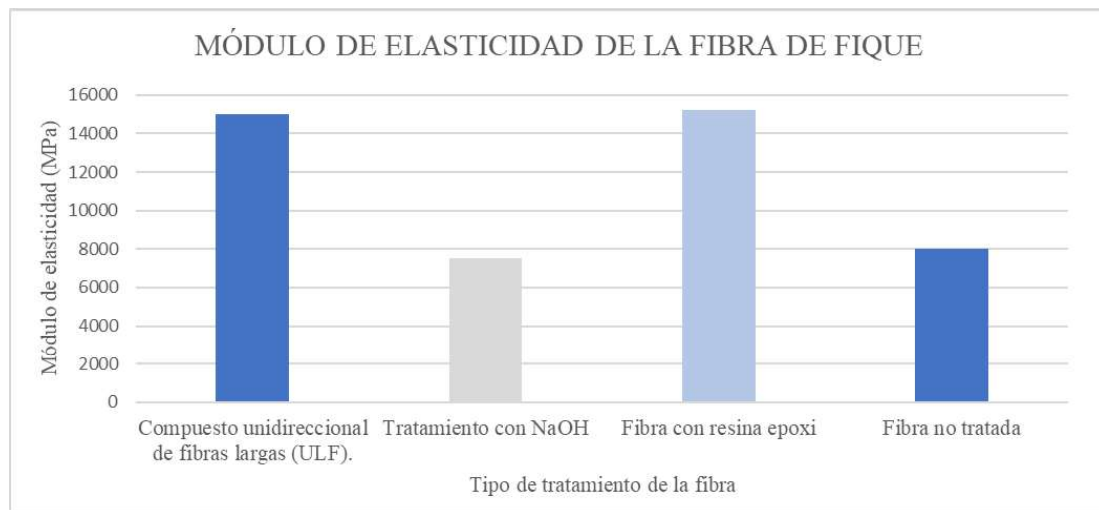


Figura 15. Módulo de elasticidad de la fibra de fique con diferentes tratamientos.

En primer lugar, se puede identificar de que la fibra de fique no tratada posee un módulo de elasticidad de aproximadamente 8000 MPa (Gómez, 2009); En el cual el mismo autor, tras realizar un tratamiento superficial a esta fibra natural mediante la aplicación de un 5 % de solución alcalina (NaOH), disminuye un poco el módulo de elasticidad el cual alcanza aproximadamente los 7800 MPa; Por lo tanto, se logra determinar que este procedimiento de alcalinización de la fibra no resulta efectivo, ya que disminuye levemente su comportamiento mecánico.

Por otro lado, el módulo de elasticidad obtenido para el compuesto unidireccional de fibras largas (ULF) desarrollado por (Barandaoa et ál., 2017), y el tratamiento empleado a las fibras con la fabricación de un compuesto entre la fibra de fique y resina epoxi (Sathiamurthi et ál., 2021), obtuvieron resultados muy similares ya que el módulo obtenido por ambos autores es de aproximadamente 15000 MPa, se puede concluir que ambos tratamientos a la fibra de fique resultan muy efectivos, ya que se logra aumentar el módulo de elasticidad del material en un 90 %, lo que significa que se logra incrementar considerablemente la rigidez del material.

Otra manera de evaluar la eficiencia de los tratamientos empleados a la fibra de fique es mediante los valores obtenidos por los distintos autores de la resistencia a la tracción a partir del uso de la máquina universal siguiendo las normas ASTM D638, ASTM C1557-03, ASTM D3822 / D3822M – 14. Los resultados son los siguientes:

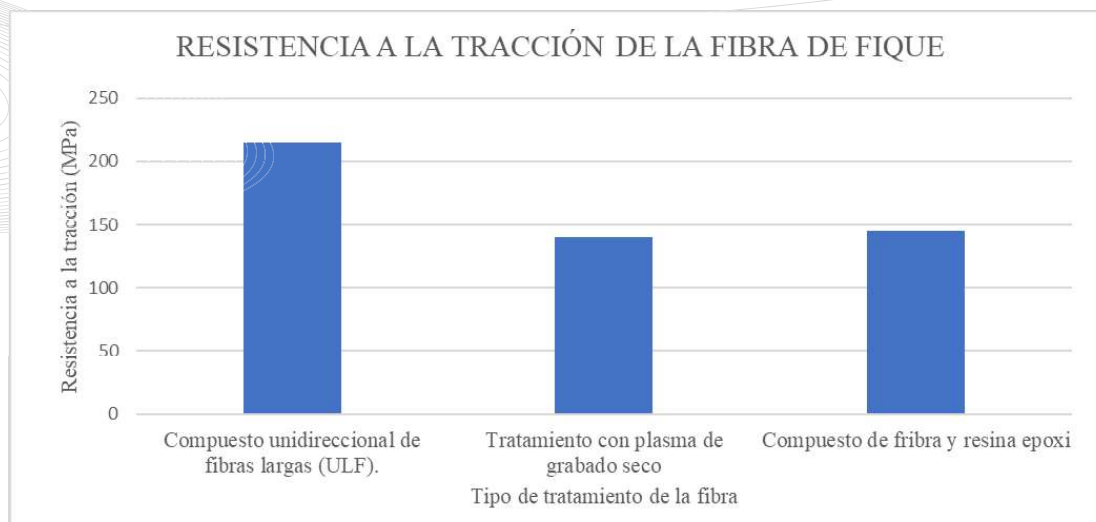


Figura 16. Resistencia a la tracción de la fibra de fique con diferentes tratamientos.

Como se puede evidenciar en la anterior figura, el tratamiento con plasma de grabado seco elaborado por (Luna et ál., 2017), y el compuesto entre fibra y resina epoxi (Sathiamurthi et ál., 2021), obtuvieron valores de similares, con valores de resistencia a la tracción de 140 MPa y 145 MPa respectivamente. La metodología empleada para la fabricación de un compuesto unidireccional de fibras largas (ULF) resulta el más efectivo respecto a la medición de este parámetro mecánico de la fibra del fique, con el cual, se logra alcanzar una resistencia a la tracción máxima de 215 MPa. Por lo tanto, empleando esta metodología se logra aumentar su resistencia en un 48 % aproximadamente respecto a los otros dos métodos analizados.

De esta manera, se logra determinar de que el módulo elasticidad y la resistencia a la tracción de los compuestos generados con la fibra de fique, dependen principalmente de la adhesión entre la fibra y la matriz a emplearse. Es de vital importancia aplicar el adecuado tratamiento al material vegetal ya que este posee diversas irregularidades en su superficie y esto impide que las fibras se adhieran de manera adecuada, por lo tanto, los esfuerzos de tensión no se transitarían de manera adecuada en todo el elemento y provocaría un rompimiento inmediato en el material.

La resistencia de la fibra de fique radica principalmente en el tratamiento que se le pueda aplicar, lo que implica que se pueden obtener materiales de excelente calidad a partir de este elemento natural, siempre y cuando se maneje un adecuado proceso de tratamiento y curado principalmente verificando la correcta orientación de las fibras, así como el tratamiento empleado para mejorar su adhesión y mejorar las propiedades de resistencia.

5. CONCLUSIONES

Se puede determinar la gran importancia que posee la elección del tratamiento adecuado a la fibra de fique, ya que es una variable dependiente la cual afecta directamente las propiedades de resistencia del material.

Dentro de las distintas metodologías empleadas para el tratamiento de la fibra de fique, es posible establecer que la más óptima es la de los compuestos unidireccionales de fibra larga (ULF), ya que con esta técnica de disposición de las fibras aumenta considerablemente las propiedades de resistencia como el módulo de elasticidad y resistencia a la tracción.

El uso del tratamiento a la fibra de fique mediante el uso de plasma de grabado en seco resulta una buena alternativa para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de este elemento natural, ya que proporciona un aumento respecto a la resistencia de la fibra debido a la alteración que genera en la fibra, la cual genera una superficie mucho más gruesa y rugosa que permite una mejor adherencia en la matriz.

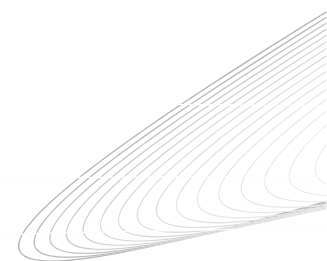
La fibra de fique presenta unas características adecuadas físico-mecánicas respecto a otras fibras vegetales (coco y bagazo de caña). Es importante tener en cuenta de que al tratarse de un elemento natural se presenta una alta irregularidad en su estructura, por lo tanto, es necesario el tratamiento con soluciones alcalinas (NaOH) para una mejor adhesión y composición de la matriz de la fibra, que mejora considerablemente sus condiciones de resistencia y deformabilidad, en este caso es positiva la caracterización de la fibra de fique su posible uso en la elaboración de geomantos para la protección de taludes ante la erosión, sustituyendo de una manera amigable con el medio ambiente los elementos fabricados con fibras sintéticas.

Es necesario evaluar el tipo de resina epoxi con el que han trabajado algunos autores para elaborar las muestras sometidas a los ensayos de laboratorio, ya que algunas pueden resultar altamente contaminantes y no tendría relación alguna con la búsqueda de la fabricación de materiales amigables con el medio ambiente.

Hacer uso de fibras naturales como el fique en este momento en el que se busca disminuir la contaminación para reducir factores como el cambio climático, es una gran estrategia para aportar positivamente al medio ambiente, así como al suelo que se busca estabilizar; ya que, mediante esta se le aporta nutrientes, contención y minimización de erosión.

Se recomienda realizar más estudios de la resistencia y funcionalidad de la fibra de fique en condiciones variables de precipitación, temperatura y clima; ya que de acuerdo con las referencias consultadas estos parámetros son mínimamente tenidos en cuenta, pero para hacer un estudio más detallado serían muy útiles para brindar un aporte significativo.

Por otro lado, el uso de las fibras naturales para la construcción de geomantos resulta una alternativa factible, sostenible y amigable con el medio ambiente, ya que se ha demostrado que estos materiales brindan buenas condiciones de resistencia y durabilidad presentando además bajos costos en su producción; Es importante seguir en este campo de la caracterización de las fibras naturales (fique, coco, bagazo de caña, etc.) ya que poseen distintas ventajas dentro de su aplicación como refuerzo y control de la erosión en taludes, en procesos importantes como la revegetalización que brinda mayor soporte y resistencia del suelo.



REFERENCIAS

- Aguirre, G., y Valencia, J. (2020). Mejoramiento de las propiedades mecánicas de suelos finos mediante la adición de residuos provenientes de fibras vegetales. *Sell journal*, 5(1), 55.
- Alegre, C. (2018). Resistencia a la flexión en vigas de concreto $f'_c=201$ kg/cm², al adicionar en un 5% y 10% de fibra de agave lechuguilla. Desarrollo de la expresión oral a través de títeres con niños de 5 años de la i.e. no 821067 san pablo - cajamarca, 1–113. http://repositorio.usanpedro.edu.pe/bitstream/handle/usanpedro/7765/tesis_58639.pdf?sequence=1&isallowed=y
- Barandaoa, V., Infanteb, A., Deusc. (2017). Implementation of eco-sustainable biocomposite materials reinforced by ompitimized agave fibers. Palermo, Italia: University of Palermo.
- Caicedo, L., y Ardila, P. (2017). Beneficios de los mantos de control de erosión temporal para la recuperación y protección de taludes y representación de un modelo físico de laboratorio. 111.
- Chopra, A., y Razahi, M. (2020). A review of using sisal fiber and coir fiber as additives in stone matrix asphalt. *International research journal of engineering and technology*, july. [Www.irjet.net](http://www.irjet.net)
- Coudert, I. (2019). Influencia del tratamiento superficial de las fibras de fique en las propiedades mecánicas del compuesto fibra-matriz cementante. 110. https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/78742/tesis_loic_coudert_final.pdf?sequence=1&isallowed=y
- Chubarenkoa B, Esiukova A., Pinchuk P., y Simonc F. (2022). Conjunto de datos sobre la contaminación por desechos de material geosintético en la costa sudoriental del Báltico. Moscú, Rusia: BAM Instituto Federal de Investigación y Ensayo de Materiales.
- Díaz, C. (2011). Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización. *Ingeniería e Investigación*, 31(3), 80–90. <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v31n3/v31n3a09.pdf>
- De Moya, L. (2021). Exploración de la viabilidad para uso de la fibra de fique como material sostenible en el reforzamiento del concreto. Un enfoque eco-amigable como alternativa de la fibra de polipropileno.
- DIP R., Sarkar B (2000). Characterization of Alkali-Treated Jute Fibers for Physical and Mechanical Properties. Calcutta.s.n.
- Echeverry, R., Franco L., y Gonzáles M. (2013). Fique en Colombia. Editorial ITM.
- García L., D. A., y Romero N., A. (2019). Verificación de resistencia entre la estabilización de suelo-cemento y la estabilización con suelo-cemento y fibra de fique. *universidad de Ibagué*, 3, 1–9.
- Geo Andes. (s.f.). Geomembranas pvc. Obtenido de: https://www.geoandes.co/geosinteticos/geomembranas_pvc/
- Gobernación de Boyacá. (2018). Plan integral de desarrollo agropecuario y rural con enfoque territorial. Agencia de desarrollo rural.
- Gómez, J. (2009). Diseño de un material compuesto con fibra natural para sustituir la utilización de la fibra de vidrio. Universidad EAFIT, 10.
- González, D. I., Castro Olivares, J. E., Flores Méndez, J., Mendoza Quiñónez, J. A., Michua Camarillo, A., y Aparicio Razo, M. (2021). Evaluación y comparación de resistencia a la tracción y flexión

- de Quiote del Maguey Manso (Agave Salmiana) contra bambú Guadua. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 22(3), 1–6. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.3.019>
- Hashemifard, H., Mehranzadeh, M., & Chenari, M. (2012). Mechanical and physical properties of sugarloaf. *Advances in environmental biology*, 6(1), 368–375.
- Hernández, R., Pérez, D., y Rincón, J. D. (2015). Implementación de fibras naturales en la estabilidad de taludes. Preliminary Cost Assessment for Offshore Wind Energy in Puerto Rico. <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.186>
- Jaramillo, P. (2017). Mejora de las condiciones de durabilidad de la fibra de fique como elemento reforzante del concreto. Universidad pontifica bolivariana, 6–18
- Luna, A. Mariño, J. Lizarazo, O. Beltrán. (2017). Dry etching plasma applied to fique fibers: influence on their mechanical properties and surface appearance. Bogotá-[9] [9] [22] Colombia: Departamento de ingeniería Civil y Agricultura, Universidad Nacional de colombia.
- Luna, E., Quispe, G. (2021). Fibras de agave americana tratada con óxido de calcio en la estabilización de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco.
- Muñoz, M., Hidalgo, M., Mina, J. (2014). Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. influencia de la modificación superficial. *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 12.
- Mejía, M., y Gutiérrez, J. (2021). Potencial de mallas tejidas en fibras de fique (furcraea) para la protección del suelo y el control de erosión en los taludes.
- Ochoa, J., Magreth, J., Passos, H., Jhony, A., y Liévano, A. B. (2011). Mantos de control para la recuperación de zonas erosionadas Estudio de factibilidad para la creación de una empresa dedicada a la comercialización e instalación de mantos de control para la recuperación de zonas erosionadas.
- Ochoa, J., Jaramillo, L. (2007). Uso del jugo de fique como aditivo orgánico en el hormigón. *Scientia Et Technica*, XIII(36), 455–459. <https://www.redalyc.org/pdf/849/84903681.pdf>
- Okeola, A., Abuodha, S., y Mwero, J. (2018). The effect of specimen shape on the mechanical properties of sisal fiber-reinforced concrete. *The open civil engineering journal*, 12(1), 368–382. <https://doi.org/10.2174/1874149501812010368>
- Pacheco, P. (2016). *Produção E Aplicação De Biomantas Para Controle De Erosão Em Taludes*. 75.
- Quico, J., Quico, N. (2019). Influencia de la adición de fibra de maguey en la resistencia del concreto. Universidad peruana unión.
- Ray, S. (2018). Degradación térmica de polímeros y compuestos poliméricos. *Manual de degradación ambiental de materiales*.
- Rodríguez, L., y Díaz, J. (2019). Análisis de la respuesta mecánica en la modificación del concreto hidráulico para pavimentos mediante fibra de fique. *Universidad Piloto de Colombia*, 126(1).
- Rua, J., Buchely, M., Monteiro, S., Echeverri, G. I., Colorado, H. A. (2021). Impact behavior of laminated composites built with fique fibers and epoxy resin: a mechanical analysis using impact and flexural behavior. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 428–438. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.068>.

- Saavedra, J., y Ortega, C. (2021). Comportamiento mecánico a la flexión y compresión del concreto reforzado con fibra de fique en vigas y cilindros. Universidad Católica de Colombia, 0(0), 0.
- Sathiamurthi P., Karthi Vinith K., Sathishkumar T., Arunkumar S., Anaamalaai A. (2021). Fiber extraction and mechanical properties of Agave Americana/ Kenaf fiber reinforced hybrid epoxy composite. Tamil Nadu, India: Kongu Engineering College.
- Silva, A., De Castro, I., Pinto, E. (2019). Study of concrete properties with vegetal and polypropylene fibers for use in structural walls. *Revista materia*, 24(2). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0679>
- Soto, I., Ramalho, M. (2014). Aplicação de cinzas residuais e de fibra de sisal na produção de argamassas e concretos: revisão application of residual ash and sisal fiber in the production of mortar and concrete: review. *Ingeniería y desarrollo.*, 31(2), 344;368.
- Soluciones Ambientales Integrales S.A de C.V. (s.f.). Geomembrana de polietileno (PE). Obtenido de: <https://www.geosai.com/productos/geomembrana-de-polietileno-pe/>
- Suárez Y. (2019). Análisis de estabilidad de taludes aplicando diferentes técnicas de revegetalización.
- Taype, M., Vega, K. (2020). Incorporación de óxido de calcio y fibra de fique para el mejoramiento de la subrasante en el tramo unión Ileticia-condorcocha, junín, 2020. Universidad Andina del Cusco, 1–118. http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/gutierrez_rs-sd.pdf?sequence=1&isallowed=y
- Vásquez, D. (2018). Manual de procedimientos generales para obras de control de procesos erosivos y deslizamientos pequeños en taludes teniendo en cuenta factores in situ como el clima, las características del suelo y la morfología del terreno. Universidad de Antioquia.
- Yao Z., Jeong H., Jang Y. (2022). Environmental toxicity and decomposition of polyethylene. Jinju, Republic of Korea: Division of Applied Life Science (BK21), Department of Applied Life Chemistry, Institute of Agriculture y Life Science (IALS).
- Zapata, L. (2009). Evaluación del Jugo de Fique como aditivo oclisor de aire y su influencia en la durabilidad y resistencia del concreto. 9–133.