



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Efecto de la Adición de Nanofibras de Fique Sobre Propiedades Mecánicas en Hidrogeles Base Acrílica para Aplicaciones Agrícolas

Marcelo Alexander Guancha Chalapud

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Administración
Maestría de Profundización en Ingeniería Agroindustrial
Palmira, Colombia

2018

Efecto de la Adición de Nanofibras de Fique Sobre las Propiedades Mecánicas en Hidrogeles Base Acrílica para Aplicaciones Agrícolas

Marcelo Alexander Guancha Chalapud

Trabajo de grado maestría en profundización presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Agroindustrial

Directora

Liliana Serna Cock, Doctora en Ingeniería

Línea de Investigación:

Agroindustria de Productos no Alimentarios

Grupo de Investigación:

Bacterias Acido Lácticas y sus Aplicaciones Biotecnológicas Industriales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Administración, Departamento (Escuela, etc.)

Palmira, Colombia

2018

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, en especial a la Profesora Liliana Serna por su excelente acompañamiento académico, su orientación, por su disposición para las respectivas correcciones del trabajo escrito y su apoyo en el desarrollo de este proyecto.

Al Centro Nacional de Asistencia Técnica ASTIN – SENA, los laboratorios de Tecnoparque y Tecnoacademia Nodo Cali del SENA, por su colaboración y disposición de infraestructura para el desarrollo de esta investigación.

Resumen

En este trabajo se estudió el proceso de obtención de nanofibras a partir de fique, por el método de hidrólisis ácida utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4) combinado con ultrasonido (US). A las nanofibras obtenidas se les determinó su morfología (diámetro y longitud) utilizando microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía electrónica de transmisión (TEM) respectivamente, la presencia de grupos funcionales por espectroscopia infrarrojo (IR) y la estabilidad térmica por análisis termogravimétrico (TGA). Se obtuvieron tamaños de partícula de $25,2 \pm 6,2$ nm de diámetro y $483,8 \pm 283,2$ nm de longitud. La temperatura máxima de degradación de la nanocelulosa fue de $317^\circ C$.

Las nanofibras de fique se utilizaron como refuerzo en hidrogeles utilizando acrilato de potasio (AK) y acrilamida (AM) como monómeros. Los hidrogeles se sinterizaron por el método de polimerización en solución. La reacción se realizó en un reactor de 500 mL con tapa esmerilada, equipado con reflujo. Se prepararon suspensiones de nanofibras de fique (3, 5, 10% en peso con respecto a la concentración de monómeros) en 80 mL de agua y se dispersaron utilizando ultraturrax a 9000 rpm por 10 min. Por otro lado, se mezclaron 14,0 g de AM con 22,0 g de AK el cual se obtuvo previamente por neutralización de 16,0 g de ácido acrílico (AA) con hidróxido de potasio (KOH) 2,5 M. Posteriormente, se mezcló la solución de nanofibras y la solución de monómeros. La mezcla se agitó por 10 min, a continuación se adicionó el iniciador persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$) (0,3% en peso con respecto a la cantidad de monómeros) y el entrecruzante N,N- Metilen bis acrilamida (NMBA) (0,085% en peso con respecto a la cantidad de monómeros). La adición de nanofibras de fique en una proporción al 3% mejoró la capacidad de hinchamiento en el equilibrio (Q_{eq}) ($476 \pm 13,26$ g/g) en aproximadamente 170 veces más que el hidrogel sin fibra ($310 \pm 8,71$). Hidrogeles con proporciones de nanofibras al 5 y 10% presentan capacidad de hinchamiento ($305 \pm 12,18$ g/g y $292 \pm 13,34$ respectivamente) similares al del hidrogel sin fibra.

La adición de nanofibras de fique en hidrogeles en las proporciones estudiadas incrementaron la capacidad de retención de agua (Q_R) por encima del 50% en comparación con el hidrogel sin fibra que presenta una Q_R alrededor del 20%, siendo el hidrogel con una proporción de nanofibras del 5% el de mayor Q_R ($75,3 \pm 7,36\%$). Finalmente, los hidrogeles en proporciones de nanofibras al 5 y 10% mostraron mayor resistencia a la compresión (R_c) en referencia al hidrogel sin nanofibras. El hidrogel con nanofibras al 5% presentó la mayor resistencia a la compresión ($16,39 \pm 4,3$ kPa), 2,5 veces mayor al hidrogel sin nanofibras ($6,49 \pm 2,48$ kPa).

Palabras clave: (Análisis térmico, análisis mecánico, celulosa, fique, hidrogeles, nanofibras, superabsorbentes)

Abstract

In this work the process of obtaining nanofibers from fique by the acid hydrolysis method was studied, and sulfuric acid (H_2SO_4) combined with ultrasound (US) was used. morphology (diameter and length) of nanofibers were measured using scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM), respectively, in addition, the presence of functional groups by infrared spectroscopy (IR) and stability thermal analysis by thermogravimetric analysis (TGA) were analyzed. Particle sizes of 25.2 ± 6.2 nm in diameter and 483.8 ± 283.2 nm in length were obtained. The maximum degradation temperature of the nanocellulose was 317°C .

The fique nanofibers were used as reinforcement in hydrogels, hydrogels potassium acrylate (AK) and acrylamide (AM) as monomers were used. The hydrogels were synthesized by the solution polymerization method. The reaction was carried out in a 500 mL reactor with a ground lid, equipped with reflux. Suspensions of fique nanofibers (3, 5, 10% by weight with respect to the concentration of monomers) in 80 mL of water were prepared, and these were dispersed using an ultraturrax at 9000 rpm for 10 min. On the other hand, 14.0 g of AM with 22.0 g of AK were mixed. AK was previously obtained by neutralization of 16.0 g of acrylic acid (AA) with 2.5 M potassium hydroxide (KOH). Subsequently, the solution of nanofibers and the monomer solution was mixed. The mixture was stirred for 10 min, and subsequently, potassium persulfate initiator ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) (0.3% by weight with respect to the number of monomers) and the crosslinker N, N-Methylene bis acrylamide (NMBA) were added (0.085% by weight with respect to the amount of monomers). The addition of fique nanofibers in a 3% ratio improved the swelling capacity at equilibrium (Q_{eq}) (476 ± 13.26 g / g) by approximately 170 times more than the hydrogel without fiber (310 ± 8.71). Hydrogels with proportions of nanofibers at 5 and 10% showed swelling capacity (305 ± 12.18 g / g and 292 ± 13.34 respectively) like hydrogel without fiber.

The addition of fique nanofibers in hydrogels increased the water retention capacity (Q_R) by more than 50% compared to the hydrogel without fiber that presented a Q_R around 20%, the hydrogel that presented the highest Q_R was the hydrogel added with 5% nanofibers ($75.3 \pm 7.36\%$). Finally, hydrogels with 5 and 10% of nanofibers showed

greater resistance to compression (R_c) compared to hydrogel without nanofibers. The hydrogel with 5% nanofibers had the highest compressive strength (16.39 ± 4.3 kPa), 2.5 times greater than the hydrogel without nanofibers (6.49 ± 2.48 kPa).

Keywords: Thermal analysis, mechanical analysis, cellulose, fique, hydrogels, nanofibers, superabsorbents.

Contenido

| | Pág. |
|--|-------------|
| Resumen | VII |
| Lista de figuras | XIII |
| Lista de tablas | XIV |
| Introducción | 1 |
| 1. Generalidades | 5 |
| 1.1 Planteamiento del problema | 5 |
| 1.2 Justificación | 7 |
| 1.3 Hipótesis | 9 |
| 1.4 Pregunta de investigación | 9 |
| 1.5 Objetivos | 9 |
| 1.5.1 General | 9 |
| 1.5.2 Específicos | 9 |
| 2. Marco Teórico | 11 |
| 2.1 Fibras vegetales | 11 |
| 2.1.1 Composición de fibras vegetales | 11 |
| 2.1.2 Características de las fibras de fique | 14 |
| 2.2 Modificación de fibras naturales | 14 |
| 2.3 Obtención de nanofibras a partir de fibras vegetales | 16 |
| 2.4 Síntesis de hidrogeles a partir de fibras vegetales | 19 |
| 2.5 Síntesis de hidrogeles base acrílica utilizando nanofibras de celulosa | 21 |
| 2.6 Métodos de caracterización de hidrogeles | 24 |
| 2.6.1 Capacidad de hinchamiento | 24 |
| 2.6.2 Propiedades mecánicas | 24 |
| 2.6.3 Métodos <i>in vitro</i> para medir la capacidad y retención de agua | 26 |
| 2.7 Aplicación de hidrogeles y evaluación de su eficiencia en el suelo | 27 |
| 3. Estado del arte | 29 |
| 4. Metodología | 35 |
| 4.1 Determinación del tamaño, propiedades térmicas, morfológicas y químicas de nanofibras de fique | 35 |
| 4.1.1 Pretratamiento y deslignificación de la fibra de fique | 35 |
| 4.1.2 Obtención de nanofibras de fique | 35 |
| 4.1.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM) | 36 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 4.1.4 | Análisis Infrarrojo (FTIR) | 36 |
| 4.1.5 | Análisis termogravimétrico (TGA) | 36 |
| 4.1.6 | Tamaño de partícula | 37 |
| 4.2 | Determinación de la variación de las propiedades mecánicas, capacidad de hinchamiento, capacidad de retención de agua por efecto de la aplicación de diferentes concentraciones de nanofibras de fique en hidrogeles base acrílica | 37 |
| 4.2.1 | Síntesis de hidrogeles reforzados con nanofibras de fique | 37 |
| 4.2.1 | Caracterización de los hidrogeles sintetizados | 38 |
| 4.2.2 | Evaluación de las variables de respuesta | 38 |
| 4.2.3 | Capacidad y cinética de hinchamiento | 39 |
| 4.2.4 | Capacidad de retención de agua | 40 |
| 4.2.5 | Propiedades mecánicas | 40 |
| 5. | Resultados y Análisis de Resultados | 43 |
| 5.1 | Resultados del objetivo 1 | 43 |
| 5.1.1 | Observación morfológica | 43 |
| 5.1.2 | Análisis Infrarrojo (FTIR) | 44 |
| 5.1.3 | Análisis TGA | 46 |
| 5.1.4 | Tamaño de partícula | 47 |
| 5.2 | Resultados objetivo 2 | 49 |
| 5.2.1 | Capacidad y cinética de hinchamiento | 49 |
| 5.2.2 | Capacidad de retención de agua | 51 |
| 5.2.3 | Propiedades mecánicas | 53 |
| 5.2.4 | Análisis estadístico | 56 |
| 5.2.5 | Microscopía (SEM) y estabilidad térmica | 56 |
| 5.3 | Producción académica | 59 |
| 6. | Conclusiones | 61 |
| A. | Anexo A: Resultados diámetro y longitud nanofibras | 63 |
| B. | Anexo B: Soportes estadísticos | 67 |
| C. | Anexo C: Producción académica | 95 |
| | Bibliografía | 119 |

Lista de figuras

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 2-1: Estructura fibra vegetal..... | 12 |
| Figura 2-2: Estructura química celulosa..... | 12 |
| Figura 2-3: Estructura química de la hemicelulosa..... | 13 |
| Figura 2-4: Estructura química de la lignina..... | 13 |
| Figura 2-5: Efecto del pH sobre la capacidad de hinchamiento..... | 20 |
| Figura 4-1: Montaje para determinar propiedades mecánicas..... | 41 |
| Figura 5-1: Micrografías SEM fibras de fique..... | 44 |
| Figura 5-2: Espectros infrarrojos de cada uno de los tratamientos..... | 45 |
| Figura 5-3: Resultados TGA para cada uno de los tratamientos..... | 46 |
| Figura 5-4: Micrografías TEM para nanofibras..... | 48 |
| Figura 5-5: Distribución del tamaño de partícula..... | 49 |
| Figura 5-6: Comportamiento del hinchamiento de hidrogeles sintetizados..... | 51 |
| Figura 5-7: Comportamiento de la capacidad de retención de agua de hidrogeles..... | 52 |
| Figura 5-8: Comportamiento del esfuerzo y porcentaje de deformación de hidrogeles sintetizados..... | 54 |
| Figura 5-9: Mecanismo de reacción del hidrogel sintetizado..... | 55 |
| Figura 5-10: Micrografías (SEM) hidrogel sintetizado..... | 57 |
| Figura 5-11: Resultados análisis termogravimétrico hidrogeles..... | 58 |

Lista de tablas

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 2-1: Métodos de síntesis de hidrogeles base acrílica utilizando nanofibras..... | 21 |
| Tabla 4-1: Factor y niveles del diseño experimental objetivo 2 | 39 |
| Tabla 5-1: Resultados tamaño de nanofibras de fique | 49 |
| Tabla 5-2: Parámetros de la cinética de hinchamiento..... | 51 |
| Tabla 5-3: Parámetros de la cinética de hinchamiento..... | 52 |
| Tabla 5-4: Resultado Análisis estadístico variables de respuesta | 56 |

Bibliografía

Abdul Khalil, H. P. S., Bhat, A. H., & Ireana Yusra, A. F. (2012). Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 963–979. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.078>

Abdul Khalil, H. P. S., Davoudpour, Y., Islam, M. N., Mustapha, A., Sudesh, K., Dungani, R., & Jawaid, M. (2014). Production and modification of nanofibrillated cellulose using various mechanical processes: A review. *Carbohydrate Polymers*, 99, 649–665. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.069>

Agaba, H., Orikiriza, L. J. B., Obua, J., Kabasa, J. D., & Worbes, M. (2011). Hydrogel amendment to sandy soil reduces irrigation frequency and improves the biomass of *Agrostis stolonifera*. *Agricultural Sciences*, 2(4), 544–550. <http://doi.org/10.4236/as.2011.24071>

Ahearne, M., Yang, Y., & Liu, K. (2008). Mechanical Characterisation of Hydrogels for Tissue Engineering Applications. *Tissue Engineering*, 4, 1–16. Retrieved from http://www.oulu.fi/spareparts/ebook_topics_in_t_e_vol4/abstracts/ahearne.pdf

Alexandra, S., Moreno, S., Alejandro, M., & Montoya, M. (2012). Identificación de bacterias productoras de polihidroxicanoatos (PHAs) en suelos contaminados con desechos de fique Identification of polyhydroxyalkanoate-producing bacteria in soils contaminated with fique wastes. *Revista Colombiana de Biotecnología*, XIV(2), 89–100.

Andrade-Mahecha, M. M., Pelissari, F. M., Tapia-Blácido, D. R., & Menegalli, F. C. (2015). Achira as a source of biodegradable materials: Isolation and characterization of nanofibers. *Carbohydrate Polymers*, 123, 406–415. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.01.027>

Andrade, M., Lopeez, N., Reyes, A., Echeverry, A., Molina, J., Rios, O., ... Agudelo, A. (2014). Obtención y caracterización de nanofibras de material lignocelulósico de

bagazo de caña de azúcar. *Revista Facultad Nacional De Agronomía*, 67, 1033–1035.

Aouada, F. A., de Moura, M. R., Orts, W. J., & Mattoso, L. H. C. (2011). Preparation and characterization of novel micro- and nanocomposite hydrogels containing cellulosic fibrils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(17), 9433–42. <http://doi.org/10.1021/jf202347h>

Araki, J., Yamanaka, Y., & Ohkawa, K. (2012). Chitin-chitosan nanocomposite gels: reinforcement of chitosan hydrogels with rod-like chitin nanowhiskers. *Polymer Journal*, 44(7), 713–717. <http://doi.org/10.1038/pj.2012.11>

Arévalo, D. (2012). *Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica*. WWF Colombia. Retrieved from <http://www.huellahidrica.org/Reports/Arevalo-2012-HuellaHidricaColombia.pdf>

Arredondo, A. (2009). Hidrogeles. Potenciales biomateriales para la liberación controlada de medicamentos. *Revista Ingeniería Biomédica*, 3, 83–94.

Asohofrucol. (2014). Frutas & Hortalizas. *Revista de La Asociación Hortifrutícola de Colombia*, 37(Octubre), 1–40.

Avolio, R., Bonadies, I., Capitani, D., Errico, M., Gentile, G., & Avella, M. (2015). A multitechnique approach to assess the effect of ball milling on cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 87(January 2012), 265–273. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.07.047>

Barbash, V. A., Yaschenko, O. V., Alushkin, S. V., Kondratyuk, A. S., Posudievsky, O. Y., & Koshechko, V. G. (2016). Effect of mechanochemical treatment of cellulose on characteristics of nanocellulose films. *Springer Proceedings in Physics*, 183, 513–521. http://doi.org/10.1007/978-3-319-30737-4_41

Benavides, O. L., Arango, O., Hurtado, A. M., & Rojas, M. C. (2012). Cuantificación de Sapogeninas del Jugo Fresco y Fermentado de Fique (*Furcraea gigantea*) mediante Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC-PDA). *Información Tecnológica*, 23(3), 67–76. <http://doi.org/10.4067/S0718-07642012000300009>

Bessadok, a., Marais, S., Roudesli, S., Lixon, C., & Métayer, M. (2008). Influence of chemical modifications on water-sorption and mechanical properties of Agave fibres.

- Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(1), 29–45.
<http://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.09.007>
- Candra, J., George, N., & Narayanankutty, S. (2016). Isolation and Characterization of Cellulose Nanofibrils From Arecanut Husk Fibre. *Carbohydrate Polymers*.
<http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.01.015>
- Cannazza, G., Cataldo, A., De Benedetto, E., Demitri, C., Madaghiele, M., & Sannino, A. (2014). Experimental Assessment of the Use of a Novel Superabsorbent polymer (SAP) for the Optimization of Water Consumption in Agricultural Irrigation Process. *Water*, 6(7), 2056–2069. <http://doi.org/10.3390/w6072056>
- Carrier, M., Loppinet-serani, A., Denux, D., & Lasnier, J. (2010). Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass, 5, 1–10. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.067>
- Chang, C., Han, K., & Zhang, L. (2009). Structure and properties of cellulose/poly(N-isopropylacrylamide) hydrogels prepared by IPN strategy. *Polymers for Advanced Technologies*, (December 2009), n/a-n/a. <http://doi.org/10.1002/pat.1616>
- Chang, C., & Zhang, L. (2011). Cellulose-based hydrogels: Present status and application prospects. *Carbohydrate Polymers*, 84(1), 40–53.
<http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.12.023>
- Chen, W., Yu, H., Liu, Y., Chen, P., Zhang, M., & Hai, Y. (2011). Individualization of cellulose nanofibers from wood using high-intensity ultrasonication combined with chemical pretreatments. *Carbohydrate Polymers*, 83(4), 1804–1811.
<http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.10.040>
- Cherian, B. M., Leão, A. L., De Souza, S. F., Costa, L. M. M., De Olyveira, G. M., Kottaisamy, M., ... Thomas, S. (2011). Cellulose nanocomposites with nanofibres isolated from pineapple leaf fibers for medical applications. *Carbohydrate Polymers*, 86(4), 1790–1798. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.07.009>
- Cortés, A. B., Xiomara, I., Ramírez, B., Francisco, L., Eslava, B., & Niño, R. (2007). Evaluación de hidrogeles para aplicaciones agroforestales. *Revista Ingeniería e Investigación*, 27(3), 35–44.
- Delgado, M., Recas, E., Puig, J., Arbat, G., Pereira, M., Vilaseca, F., & Mutjé, P. (2015).

- Aplicación de celulosa nanofibrilada, en masa y superficie, a la pulpa mecánica de muela de piedra: una sólida alternativa al tratamiento clásico de refinado. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 17(ahead), 0–0. <http://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000028>
- Demitri, C., Scalera, F., Madaghiele, M., Sannino, A., & Maffezzoli, A. (2013). Potential of Cellulose-Based Superabsorbent Hydrogels as Water Reservoir in Agriculture. *International Journal of Polymer Science*, 2013, 1–6.
- Dianney, D., Grimaldo, C., Edgar, J., Orjuela, A., Carmen, O., & Cardozo, A. (2010). Hacia una nueva generación de biomateriales. Primera parte. *Rev Col Or Tra*, 24(3), 168–177.
- Ekebafé, L. O., Ekebafé, L. O., Ogbeifun, D. E., & Okieimen, F. E. (2011). Polymer Applications in Agriculture. *Biokemistri*, 23(2), 81–89.
- Fan, M., Dai, D., & Huang, B. (2012). Fourier Transform Infrared Spectroscopy for Natural Fibres. *Fourier Transform–materials Analysis. InTech*.
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2013). *Afrontar la escasez de agua -un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. Informe Sobre Temas Hídricos*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i3015s.pdf>
- Feng, H., Li, J., & Wang, L. (2010). Preparation of biodegradable flax shive cellulose-based superabsorbent polymer under microwave irradiation. *BioResources*, 5(3), 1484–1495. <http://doi.org/10.15376/biores.5.3.1484-1495>
- Gallego, J., Rodríguez, G., Galvez, J., & Yang, T. (2007). A new high-intensity ultrasonic technology for food dehydration. *Drying Technology*, 25(Spring), 1893–1901.
- Gascue, B. R. De, Aguilera, R., Ramirez, M., Prin, J. L., & Torres, C. (2006). Los hidrogeles poliméricos como potenciales reservorios de agua y su aplicación en la germinación de semillas de tomate en diferentes tipos de suelos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 7(3), 199–210.
- Ghazali, S. K., Adrus, N., & Jamaluddin, J. (2014). Pineapple Leaf Fibers Coated with Polyacrylamide Hydrogel. *Applied Mechanics and Materials*, 695, 139–142. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.695.139>

- Guilherme, M. R., Aouada, F. A., Fajardo, A. R., Martins, A. F., Paulino, A. T., Davi, M. F. T., ... Muniz, E. C. (2015). Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier : A review. *European Polymer Journal*, 72, 365–385. <http://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.04.017>
- Hashaikeh, R., & Abushammala, H. (2011). Acid mediated networked cellulose: Preparation and characterization. *Carbohydrate Polymers*, 83(3), 1088–1094. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.08.081>
- Huang, Z., Liang, X., Hu, H., Gao, L., Chen, Y., & Tong, Z. (2009). Influence of mechanical activation on the graft copolymerization of sugarcane bagasse and acrylic acid. *Polymer Degradation and Stability*, 94(10), 1737–1745. <http://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.06.023>
- Hüttermann, A., Oriquiriza, L. J. B., & Agaba, H. (2009). Application of superabsorbent polymers for improving the ecological chemistry of degraded or polluted lands. *Clean - Soil, Air, Water*, 37(7), 517–526. <http://doi.org/10.1002/clen.200900048>
- IDEAM (Instituto de Estudios Ambientales). (2014). Estudio Nacional del Agua 2014. Retrieved from http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf
- IDEAM (Instituto de Estudios Ambientales). (2015). Informe del estado del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables 2012 , 2013 y 2014 (Versión preliminar) Tomo III : Calidad del agua , generación de residuos y presencia de sustancias químicas en el territorio. Retrieved from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022651/InformeTomo3.pdf>
- Jamnongkan, T., & Kaewpirom, S. (2010). Potassium Release Kinetics and Water Retention of Controlled-Release Fertilizers Based on Chitosan Hydrogels. *Journal of Polymers and the Environment*, 18(3), 413–421. <http://doi.org/10.1007/s10924-010-0228-6>
- John, M. J., & Anandjiwala, R. D. (2008). Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites. *Polymer Composites*, 29(2), 187–207. <http://doi.org/10.1002/pc.20461>
- Journals The Business. (2015). Super Absorbent Polymer Market by Type , by Application

- , by Region - Trends & Forecasts to 2020. Retrieved from <http://www.rnmarketresearch.com/super-absorbent-polymers-market-by-type-sodium-polyacrylate-polyacrylatepolyacrylamide-copolymer-others-by-application-baby-diapers-adult-diapers-women-sanitary-napkins-agriculture-oth-market-report.html>
- Kabiri, K., Omidian, H., Doroudiani, S., & M Zohuriaan. (2011). Superabsorbent Hydrogel Composites and Nanocomposites : A Review. *Polimer Composites*, 21, 278–289. <http://doi.org/10.1002/pc.21046>
- Kalia, S., Kaith, B. S., & Kaur, I. (2014). *Cellulose Fibers: Bio-and Nano-polymer Composites. Green Chemistry and Technology*. <http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Karadag, E., Baris, O., & Saraydin, D. (2005). Water uptake in chemically crosslinked poly(acrylamide-co-crotonic acid) hydrogels. *Materials and Design*, 26(4), 265–270. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.07.014>
- Krishnan, Jose, C., K. R, R., & George, K. E. (2015). Sisal nanofibril reinforced polypropylene/polystyrene blends: Morphology, mechanical, dynamic mechanical and water transmission studies. *Industrial Crops and Products*, 71, 173–184. <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.076>
- Lee, K. Y., Aitomäki, Y., Berglund, L. A., Oksman, K., & Bismarck, A. (2014). On the use of nanocellulose as reinforcement in polymer matrix composites. *Composites Science and Technology*, 105, 15–27. <http://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.08.032>
- Li, R., Fei, J., Cai, Y., Li, Y., Feng, J., & Yao, J. (2009). Cellulose whiskers extracted from mulberry: A novel biomass production. *Carbohydrate Polymers*, 76(1), 94–99. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.09.034>
- Liang, X., Huang, Z., Zhang, Y., Hu, H., & Liu, Z. (2013). Synthesis and properties of novel superabsorbent hydrogels with mechanically activated sugarcane bagasse and acrylic acid. *Polymer Bulletin*, 70(6), 1781–1794. <http://doi.org/10.1007/s00289-013-0921-4>
- Lin, N., & Dufresne, A. (2014). Nanocellulose in biomedicine: Current status and future

- prospect. *European Polymer Journal*, 59, 302–325.
<http://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.07.025>
- Liu, H., Zhang, Y., & Yao, J. (2014). Preparation and properties of an eco-friendly superabsorbent based on flax yarn waste for sanitary napkin applications. *Fibers and Polymers*, 15(1), 145–152. <http://doi.org/10.1007/s12221-014-0145-8>
- Liu, T., Qian, L., Li, B., Li, J., Zhu, K., Deng, H., ... Wang, X. (2013). Homogeneous synthesis of chitin-based acrylate superabsorbents in NaOH / urea solution. *Carbohydrate Polymers*, 94(1), 261–271.
<http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.01.010>
- Low, Z. W., Chee, P. L., Kai, D., & Loh, X. J. (2015). The role of hydrogen bonding in alginate/poly(acrylamide-co-dimethylacrylamide) and alginate/poly(ethylene glycol) methyl ether methacrylate-based tough hybrid hydrogels. *RSC Adv.*, 5(71), 57678–57685. <http://doi.org/10.1039/C5RA09926A>
- Market Research Reports. (2015). Global and China Superabsorbent Polymers (SAP) Industry Report , 2014 - 2018. Retrieved from <http://www.rnmarketresearch.com/global-and-china-superabsorbent-polymers-sap-industry-report-2014-2018-market-report.html>
- MAVDT. (2006). *Guía ambiental del subsector figuero*.
- Miao, X., Lin, J., Tian, F., Li, X., Bian, F., & Wang, J. (2015). Cellulose nanofibrils extracted from the byproduct of cotton plant. *Carbohydrate Polymers*, 136, 841–850.
<http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.09.056>
- Miembros, E., Odm, L., Estatuto, E., & Internacional, O. (2015). El agua y el medio ambiente.
- Milani, P., França, D., Balieiro, A. G., & Faez, R. (2017). Polymers and its applications in agriculture. *Polímeros*, 27(3), 256–266. <http://doi.org/10.1590/0104-1428.09316>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible. (2013). Política nacional para la gestión integral ambiental del suelo (GIAS), 138.
- Mishra, S., Mohanty, A. K., Drzal, L. T., Misra, M., & Hinrichsen, G. (2004). A Review on Pineapple Leaf Fibers, Sisal Fibers and Their Biocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 289(11), 955–974.

<http://doi.org/10.1002/mame.200400132>

- Missoum, K., Belgacem, M., & Bras, J. (2013). Nanofibrillated Cellulose Surface Modification: A Review. *Materials*, 6(5), 1745–1766. <http://doi.org/10.3390/ma6051745>
- Mo, C., Shu-quan, Z., Hua-min, L., Zhan-bin, H., & Shu-qin, L. (2006). Synthesis of Poly (acrylic acid)/ Sodium Humate Superabsorbent Composite for Agricultural Use. *Journal of Applied Polymer Science*, 102, 5137–5143. <http://doi.org/10.1002/app.24661>
- Morales, E. M., Ramirez, J. A., Albán, Á., Escobar, B. yadira, García, L. F., & Peña, M. E. (2011). Compactación de suelos cultivados con caña de azúcar en la zona sur del Valle del Cauca. Parte I. *Acta Agronómica*, 60, 245–252.
- Morán, J. I., Alvarez, V. A., Cyras, V. P., & Vázquez, A. (2008). Extraction of cellulose and preparation of nanocellulose from sisal fibers. *Cellulose*, 15(1), 149–159. <http://doi.org/10.1007/s10570-007-9145-9>
- Nitta, S., Kaketani, S., & Iwamoto, H. (2015). Development of chitosan-nanofiber-based hydrogels exhibiting high mechanical strength and pH-responsive controlled release. *European Polymer Journal*, 67, 50–56. <http://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.03.053>
- Orozco, E., Hernandez, S. L., Gomez-Salazar, S., Mendizabal, E., & Katime, I. (2011). Estudio del hinchamiento de hidrogeles acrílicos terpolimericos en agua y en soluciones acuosas de ión plumbosoPLUMBOSO. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10, 465–470.
- Passaglia, E., Bertoldo, M., Coiai, S., Augier, S., Savi, S., & Ciardelli, F. (2008). Nanostructured polyolefins / clay composites : role of the molecular interaction at the interface. *Polymers for Advanced Technologies*, 19(April), 560–568. <http://doi.org/10.1002/pat>
- Pedraza, D. F. (2005). Disponibilidad de alimentos como factor determinante de la Seguridad Alimentaria y Nutricional y sus representaciones en Brasil. *Revista de Nutricao*, 18(1), 129–143. <http://doi.org/10.1590/S1415-52732005000100012>
- Pelissari, F. M., Sobral, P. J. D. A., & Menegalli, F. C. (2014). Isolation and

- characterization of cellulose nanofibers from banana peels. *Cellulose*, 21(1), 417–432. <http://doi.org/10.1007/s10570-013-0138-6>
- Plackett, D. (2010). Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials : a review, 459–494. <http://doi.org/10.1007/s10570-010-9405-y>
- Queirós, M. V. A., Bezerra, M. N., & Feitosa, J. P. A. (2017). Composite Superabsorbent Hydrogel of Acrylic Copolymer and Eggshell: Effect of Biofiller Addition, 28(10), 2004–2012.
- Quinchía, M., & Uribe, J. (2016). Aprovechamiento ambiental de residuos agroindustriales. *Propiedad Pública Apropiación Social Del Conocimiento*.
- Rämänen, P., Penttilä, P. A., Svedström, K., Maunu, S. L., & Serimaa, R. (2012). The effect of drying method on the properties and nanoscale structure of cellulose whiskers. *Cellulose*, 19(3), 901–912. <http://doi.org/10.1007/s10570-012-9695-3>
- Rashidzadeh, A., & Olad, A. (2014). Slow-released NPK fertilizer encapsulated by NaAlg-g-poly(AA-co-AAm)/MMT superabsorbent nanocomposite. *Carbohydrate Polymers*, 114, 269–278. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.010>
- Rodrigues, Cristiane, S., Antonio, P., R, F., Rubira, A., Muniz, E., & Martins, A. (2013). Superabsorbent Hydrogel Composites with a Focus on Hydrogels Containing Nanofibers or Nanowhiskers of Cellulose and Chitin. *Journal of Applied Polymer Science*, 1–13. <http://doi.org/10.1002/app.39725>
- Rodrigues, R. F., Trevenzoli, R. L., Santos, L. R. G., Leão, V. A., & Botaro, V. R. (2006). Adsorção de metais pesados em serragem de madeira tratada com ácido cítrico. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 11(1), 21–26. <http://doi.org/10.1590/S1413-41522006000100004>
- Roman, M., & Winter, W. T. (2004). Effect of sulphate groups from sulphuric acid hydrolysis on the thermal degradation behaviour of bacterial cellulose. *Biomacromolecules*, (5), 1671–1677.
- Sannino, A., Demitri, C., & Madaghiele, M. (2009). Biodegradable cellulose-based hydrogels: Design and applications. *Materials*, 2(2), 353–373. <http://doi.org/10.3390/ma2020353>
- Shi, X., Wang, W., Zheng, Y., & Wang, A. (2014). Utilization of hollow kapok fiber for the

- fabrication of a pH-sensitive superabsorbent composite with improved gel strength and swelling properties. *RSC Adv.*, 4(92), 50478–50485. <http://doi.org/10.1039/C4RA10866C>
- Singh, A., Sarkar, D., Kumar Singh, A., Parsad, R., & Singh Parmar, B. (2010). Studies on Novel Nanosuperabsorbent Composites: Swelling Behavior in Different Environments and Effect on Water Absorption and Retention Properties of Sandy Loam Soil and Soil-less Medium. *Journal Of Applied Polymer Science*, 120, 1448–1458. <http://doi.org/10.1002/app>
- Song, Y. K., Mei, I., Chew, L., Shean, T., Choong, Y., Tan, J., & Tan, K. W. (2016). Isolation of Nanocrystalline Cellulose from oil palm empty fruit bunch – A response surface methodology study, *04009*, 2–6.
- Soni, B., Hassan, E. B., & Mahmoud, B. (2015). Chemical isolation and characterization of different cellulose nanofibers from cotton stalks. *Carbohydrate Polymers*, 134, 581–589. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.08.031>
- Sosiati, H., Wijayanti, D. A., Triyana, K., & Kamiel, B. (2017). Morphology and crystallinity of sisal nanocellulose after sonication. *AIP Conference Proceedings*, 1877. <http://doi.org/10.1063/1.4999859>
- Spagnol, C., Rodrigues, F. H. a, Neto, A. G. V. C., Pereira, A. G. B., Fajardo, A. R., Radovanovic, E., ... Muniz, E. C. (2012). Nanocomposites based on poly(acrylamide-co-acrylate) and cellulose nanowhiskers. *European Polymer Journal*, 48(3), 454–463. <http://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2011.12.005>
- Spagnol, C., Rodrigues, F., Pereira, A., Fajardo, A., Rubira, A., & Muniz, E. (2012a). Superabsorbent hydrogel composite made of cellulose nanofibrils and chitosan-graft-poly(acrylic acid). *Carbohydrate Polymers*, 87(3), 2038–2045. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.10.017>
- Spagnol, C., Rodrigues, F., Pereira, A., Fajardo, A., Rubira, A., & Muniz, E. (2012b). Superabsorbent hydrogel nanocomposites based on starch- g -poly (sodium acrylate) matrix filled with cellulose nanowhiskers. *Cellulose*, 19, 1225–1237. <http://doi.org/10.1007/s10570-012-9711-7>
- Suelos, P. D. E. L. O. S., Amézquita, E., & Luis, C. (1994). La compactacion del suelo y

- sus efectos en la productividad de los suelos.
- Super Absorbent Polymers Market Analysis. (2016). By Application (Agriculture , Baby Diapers , Adult Incontinence Products , Female Hygiene Products , Others) And Segment Forecasts To 2022, pp. 1–7.
- Superabsorbent Polymer Market for Agriculture. (2015). Superabsorbent Polymer Market for Agriculture - Global Industry Analysis , Size , Share , Growth , Trends and Forecast , 2015 - 2023, pp. 1–7.
- Thakur, V. K., & Thakur, M. K. (2014). Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites. *Carbohydrate Polymers*, *109*, 102–117. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.03.039>
- Thomas, S., Paul, S. A., Pothan, L. A., & Deepa, B. (2011). Chapter 1 Natural Fibres: Structure, Properties and Applications. In *Bio-and Nano-Polymer Composites* (pp. 1–42). <http://doi.org/10.1007/978-3-642-17370-7>
- Torres, J. (2008). *Riegos. Cenicaña*.
- Trifol, J., Sillard, C., Plackett, D., Szabo, P., Bras, J., & Daugaard, A. E. (2017). Chemically extracted nanocellulose from sisal fibres by a simple and industrially relevant process. *Cellulose*, *24*(1), 107–118. <http://doi.org/10.1007/s10570-016-1097-5>
- Turrado, J., Saucedo, A. R., Ramos, J., & Reynoso, M. L. (2008). Behavior of recycled cellulose fiber during the hydration process. *Comportamiento de La Fibra de Celulosa Reciclada En El Proceso de Hidratación*, *19*(5), 129–136. <http://doi.org/10.1612/inf.tecnol.3955it.07>
- Ullah, F., Othman, M. B. H., Javed, F., Ahmad, Z., & Akil, H. M. (2015). Classification, processing and application of hydrogels: A review. *Materials Science and Engineering: C*, *57*, 414–433. <http://doi.org/10.1016/j.msec.2015.07.053>
- Vera, F. L., Arturo, H., Cortes, M., Murcia, C. V., & Galvis, I. C. (2014). Modificación superficial de micro fibras de celulosa obtenidas a partir de bagazo de caña de azúcar usando silanización.
- Vieyra, H., Figueroa-lópez, U., Guevara-morales, A., Vergara-porras, B., Martín-martínez, E. S., & Aguilar-mendez, M. Á. (2015). Optimized Monitoring of Production of

- Cellulose Nanowhiskers from *Opuntia ficus-indica* (Nopal Cactus). *International Journal of Polymer Science*, 2015. <http://doi.org/10.1155/2015/871345>
- Vundavalli, R., Vundavalli, S., Nakka, M., & Rao, D. S. (2015). Biodegradable Nano-Hydrogels in Agricultural Farming - Alternative Source For Water Resources. *Procedia Materials Science*, 10(Cnt 2014), 548–554. <http://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.06.005>
- Wang, B., & Sain, M. (2007). Dispersion of soybean stock-based nanofiber in a plastic matrix, 546(December 2006), 538–546. <http://doi.org/10.1002/pi>
- Wen, Y., Zhu, X., Gauthier, D., An, X., Cheng, D., Ni, Y., & Yin, L. (2015). Development of poly (acrylic acid)/ nanofibrillated cellulose superabsorbent composites by ultraviolet light induced polymerization. *Cellulose*, 2499–2506. <http://doi.org/10.1007/s10570-015-0639-6>
- Xie, J., Hse, C., Hoop, C. F. De, Hu, T., Qi, J., & Shupe, T. F. (2016). Isolation and characterization of cellulose nanofibers from bamboo using microwave liquefaction combined with chemical treatment and ultrasonication. *Carbohydrate Polymers*, 151, 725–734. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.06.011>
- Xie, J., Hse, C., Li, C., Shupe, T., Hu, T., Qi, J., & Hoop, C. (2016). Characterization of Microwave Lique fi ed Bamboo Residue and Its Potential Use in the Generation of Nano fi brillated Cellulosic Fiber. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. <http://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00497>
- Yang, J., Han, C. R., Duan, J. F., Xu, F., & Sun, R. C. (2013). Mechanical and viscoelastic properties of cellulose nanocrystals reinforced poly(ethylene glycol) nanocomposite hydrogels. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 5(8), 3199–3207. <http://doi.org/10.1021/am4001997>
- Zhang, P. P., Tong, D. S., Lin, C. X., Yang, H. M., Zhong, Z. K., Yu, W. H., & Wang, H. (2014). Effects of acid treatments on bamboo cellulose nanocrystals. <http://doi.org/10.1002/apj>
- Zhang, S., Guan, Y., Fu, G. Q., Chen, B. Y., Peng, F., Yao, C. L., & Sun, R. C. (2014). Organic/inorganic superabsorbent hydrogels based on xylan and montmorillonite. *Journal of Nanomaterials*, 2014. <http://doi.org/10.1155/2014/675035>

- Zhong, K., Zheng, X. L., Mao, X. Y., Lin, Z. T., & Jiang, G. B. (2012). Sugarcane bagasse derivative-based superabsorbent containing phosphate rock with water-fertilizer integration. *Carbohydrate Polymers*, *90*(2), 820–826. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.06.006>
- Zhou, C., & Wu, Q. (2011). A novel polyacrylamide nanocomposite hydrogel reinforced with natural chitosan nanofibers. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, *84*(1), 155–162. <http://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2010.12.030>
- Zhou, C., Wu, Q., Yue, Y., & Zhang, Q. (2011). Application of rod-shaped cellulose nanocrystals in polyacrylamide hydrogels. *Journal of Colloid and Interface Science*, *353*(1), 116–123. <http://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.09.035>
- Zhou, Y., Fu, S., Zhang, L., & Zhan, H. (2013). Superabsorbent nanocomposite hydrogels made of carboxylated cellulose nanofibrils and CMC-g-p(AA-co-AM). *Carbohydrate Polymers*, *97*(2), 429–435. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.04.088>