

# Evaluación de la relación molar polioli/diisocianato en las propiedades fisicoquímicas de biopoliuretano producido a partir de grasa avícola

Evaluation of the molar polyol/diisocyanate ratio in the physicochemical properties of biopolyurethane produced from poultry fat

—

Maritza del Carmen Hernández-Cruz<sup>1</sup>

maritza.hernandez@unach.mx • ORCID: 0000-0002-1165-2026

Yenifer Ramírez-Roblero<sup>2</sup>

M13270757@tuxtla.tecnm.mx • ORCID: 0009-0006-3369-7950

Rocío Meza-Gordillo<sup>2</sup>

rocio.mg@tuxtla.tecnm.mx • ORCID: 0000-0002-3975-7372

María Celina Luján-Hidalgo<sup>2</sup>

maria.lh@tuxtla.tecnm.mx • ORCID: 0000-0002-5720-9652

José Humberto Castañón-González<sup>2</sup>

jose.cg@tuxtla.tecnm.mx • ORCID: 0000-0003-3625-6414

1 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS, MÉXICO, CHIAPAS, MÉXICO

2 INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS, MÉXICO



Para citar este artículo:

Hernández Cruz, M. del C., Ramírez Roblero, Y., Meza Gordillo, R., Luján Hidalgo, M. C., & Castañón González, J. H. Evaluación de la relación molar polioliol/diisocianato en las propiedades fisicoquímicas de biopoliuretano producido a partir de grasa avícola. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*, 13(35). <https://doi.org/10.31644/IMASD.35.2024.a05>

## RESUMEN

Los poliuretanos convencionales son los plásticos con mayor demanda en el mundo, se fabrican a partir de derivados del petróleo que es un recurso no renovable y contribuye a la contaminación ambiental. Sin embargo, los biopoliuretanos se producen a partir de fuentes renovables, como aceites vegetales o azúcares derivados de plantas, ayudan a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y disminuyen la huella de carbono. La síntesis de biopoliuretanos permite ajustar las propiedades de los materiales finales para adaptarse a diferentes aplicaciones como la industria automotriz, la construcción, la fabricación de muebles y la industria textil. Pueden variar en términos de resistencia, elasticidad, rigidez y capacidad de carga. Estas características dependen de la estructura química y concentración del polioliol y diisocianato con el que se producen.

En este trabajo se describe la síntesis de poliuretanos utilizando polioliol proveniente de grasa avícola y diisocianato de isoforona y el efecto de la relación polioliol/isocianato (OH/NCO) en las propiedades fisicoquímicas de los poliuretanos obtenidos. En los espectros de infrarrojo (FTIR) se observó la presencia de la banda  $3350\text{ cm}^{-1}$  que corresponde al enlace -NH y la ausencia del estiramiento del grupo isocianato (NCO) a  $2270\text{ cm}^{-1}$ , lo que indica que todos los grupos isocianato reaccionaron durante la polimerización. Se evaluaron poliuretanos generados con relaciones molares polioliol/isocianato (OH/NCO) 1:3, 1:4 y 1:5 observándose que a mayor relación molar aumenta la rigidez y la resistencia a la compresión del biopoliuretano, probablemente por la mayor formación de entrecruzamientos.

### Palabras clave:

*Bioplásticos; residuos; rigidez; compresión.*

— Abstract—

Conventional polyurethanes are the most demanded plastics in the world, they are manufactured from petroleum derivatives which is a non-renewable resource and contributes to environmental pollution. However, biopolyurethanes are produced from renewable sources, such as vegetable oils or plant-derived sugars, help reduce dependence on fossil fuels and decrease the carbon footprint. The synthesis of biopolyurethanes makes it possible to adjust the properties of the final materials to suit different applications such as the automotive industry, construction, furniture manufacturing and the textile industry. They can vary in terms of strength, elasticity, stiffness and load capacity. These characteristics depend on the chemical structure and concentration of the polyol and diisocyanate with which they are produced.

This paper describes the synthesis of polyurethanes using polyol from poultry fat and isoforone diisocyanate and the effect of the polyol/isocyanate (OH/NCO) ratio on the physicochemical properties of polyurethanes obtained. In the infrared spectra (FTIR) was observed the presence of the band  $3350\text{ cm}^{-1}$  corresponding to the -NH bond and the absence of stretching of the isocyanate group (NCO) to  $2270\text{ cm}^{-1}$ , indicating that all isocyanate groups reacted during polymerization. Polyurethanes generated with molar ratios polyol/isocyanate (OH/NCO) 1: 3, 1: 4 and 1: 5 were evaluated, observing that the higher the molar ratio increases the rigidity and compressive strength of biopolyurethane, probably due to the greater formation of crosslinks.

**Keywords:**

*Bioplastics; waste; stiffness; compression.*

Los poliuretanos son materiales poliméricos versátiles que, desde la síntesis desarrollada por Bayer *et al.* en 1937, se han utilizado para generar productos con diferentes características como resinas, recubrimientos, espumas flexibles y rígidas, elastómeros y adhesivos. Entre estas aplicaciones, las espumas rígidas y flexibles se han utilizado principalmente en la industria del transporte, construcción, embalaje y de muebles. Los poliuretanos son polímeros que generalmente son producidos por reacciones de poliadición entre polioles e isocianatos que, dependiendo de las estructuras de éstos serán las propiedades físico mecánicas del poliuretano obtenido (Shen, *et al.* 2019). Por ejemplo, Kasprzyk y Datta (2019) observaron que la concentración de grupos isocianato en el prepolímero, tiene efecto en el grado de separación de la fase del segmento duro que puede ser correlacionado con la estructura química y las propiedades mecánico-dinámicas del poliuretano. Por otra parte, Ziegłowski *et al.* (2019), investigaron la reactividad de la lignina Kraft modificada con diferentes isocianatos comerciales en la reacción con polioles convencionales, identificando que la morfología, el módulo de elasticidad y la densidad son diferentes en todos los poliuretanos obtenidos. Daneshvar *et al.* (2019) prepararon poliuretanos adhesivos utilizando poli 4,4'-difetil metan diisocianato y toluen diisocianato (TDI), en diferentes relaciones NCO/OH y polioliol de aserrín observando que al incrementar la relación NCO/OH a 1.7, la fuerza de corte incrementó.

Como se puede observar, se han realizado diferentes esfuerzos para desarrollar biopoliuretanos utilizando polioles o isocianatos de origen biológico. Principalmente están descritas las síntesis de polioles a partir de aceites vegetales como de girasol, higuera, soya, ricino, palma, oliva, linaza, semilla de uva, maíz, jatropha y aceite de salvado de arroz (Ang *et al.*, 2014; Calvo-Correas *et al.*, 2015; Fu *et al.*, 2019; Ismail *et al.*, 2011; Narine *et al.*, 2007; Purwanto, 2010; Rosnah *et al.*, 2016; Shen *et al.*, 2019; Valero *et al.*, 2008). Sin embargo, estos aceites al ser comestibles generan la controversia de su uso para fines industriales. La grasa avícola se ha utilizado como materia prima para la producción de biodiesel, biolubricantes y polioles (Galeano y Guapacha, 2011; Rojas y Girón, 2011, Ramírez *et al.*, 2023) por lo que en este proyecto se propone el uso de polioliol de origen avícola para la producción de biopoliuretanos y su estudio en el efecto de la relación molar OH/NCO sobre sus propiedades físicoquímicas.

## METODOLOGÍA

### *Síntesis del polioliol a partir de grasa avícola*

La grasa avícola fue extraída, purificada y caracterizada de acuerdo con lo descrito por Hernández-Cruz *et al.* (2015). Para la obtención del polioliol

se utilizó la metodología descrita por Ramírez, *et al.* (2023) en donde se epoxidó la grasa avícola añadiendo ácido acético y peróxido de hidrógeno en relación estequiométrica con el número de moles de dobles enlaces presentes en el aceite. Para determinar los números de moles de los dobles enlaces de la grasa avícola se utilizó el índice de yodo de acuerdo con la siguiente fórmula (ecuación 1):

$$(1) \quad mol(=) = IY / (2 \times Mi \times 100) \times P$$

Donde:

mol (=) moles de los dobles enlaces presentes en el aceite

IY= 63.09 I<sub>2</sub>/100g.

Mi = peso molecular del yodo en gramos.

P = peso de muestra en gramos.

Posteriormente de acuerdo con los cálculos obtenidos se colocó la muestra en un matraz de 3 bocas y se añadió ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH) y como catalizador H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. La reacción se mantuvo en agitación constante (350 rpm), en un baño de aceite a una temperatura menor a 30 °C, posteriormente a esta misma temperatura se agregó H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> gota a gota por 30 minutos, una vez agregado se aumentó la temperatura y se mantuvo durante 6 h. Pasado el tiempo de reacción, se adicionó bicarbonato de sodio al 5% v/v, se agitó y se colocó el contenido del matraz en un embudo de separación, para realizar lavados adicionando dos veces NaHCO<sub>3</sub> al 10%, posteriormente agua, y por último NaHCO<sub>3</sub> al 5% hasta alcanzar la neutralidad que se midió con un potenciómetro modelo Sesión 3 (HACH, Colorado, USA) con un electrodo de pH modelo 51935-00 (HACH, Colorado, USA). Por último, a la fase orgánica se le adicionó Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> anhidro al 20% p/p, para eliminar las trazas de agua que pudiera quedar de los lavados (Salimon *et al.*, 2014).

Para caracterizar al polioliol sintetizado se realizó espectroscopía de IR utilizando un espectrofotómetro IR Nicolet™ (Thermo Scientific, Massachusetts, EE. UU.) en el intervalo de 650-4000 cm<sup>-1</sup> con una resolución de 4 cm<sup>-1</sup> y 16 barridos (Jayavani *et al.*, 2017). La estructura del polioliol se confirmó mediante resonancia magnética nuclear (RMN) de <sup>13</sup>C utilizando un equipo modelo DD2 (Agilent, California, EE. UU.) de 500 MHz. Los experimentos se realizaron a 25 °C y cloroformo deuterado como disolvente. Hecha la disolución de 5mg de muestra, se transfirió aproximadamente 1 mL de la solución a un tubo de RMN de 5 mm. El tubo de muestra se insertó en el imán y se dejó alcanzar el equilibrio térmico durante 10 minutos antes de realizar el experimento.

El índice de acidez se realizó de acuerdo con el método oficial AOCS Te 1a-64 (2009). Para la determinación del número de hidroxilo del polioliol se utilizó la metodología descrita por Zhang *et al.*, (2015). Se depositó en un

matraz de 50 mL, 1 g de muestra, se añadieron 10 mL de tetrahidrofurano (THF), el contenido se mezcló con la ayuda de un agitador magnético, a esta solución se le añadió 10 mL de solución catalizadora (1 g de piridina en 100 mL de THF) seguida de 5 mL de solución acetilante (5 mL de anhídrido acético en 50 mL de THF) y se agitó durante 10 min a 25°C, posteriormente se añadió 10 mL de solución de hidrólisis (20 mL de agua en 80 mL de THF) y la agitación continuó por 30 min. Esta solución se tituló potenciométricamente con la solución estándar de KOH etanólico 1 N, utilizando el potenciómetro modelo Sesión 3 (HACH, Colorado, USA), con un electrodo de pH modelo 51935-00 (HACH, Colorado, USA) hasta observar el primer cambio de pH. El cálculo del número de hidroxilo se obtuvo mediante la ecuación 2:

$$(2) \quad OHN = \frac{(V_2 - V_1 * N * 56.11)}{m} + AN$$

Donde:

OHN es el valor del número de hidroxilo

$V_2$  es el volumen de KOH gastado durante la titulación del blanco

$V_1$  es el volumen de KOH gastado durante la titulación de la muestra

N es la normalidad de la solución estándar de KOH

m es el peso de la muestra en g

AN es el índice de acidez de la muestra.

### *Obtención de poliuretanos*

Los poliuretanos (PU) se obtuvieron de acuerdo con la metodología descrita por Zhang *et al.*, (2014) con modificaciones. El polirol sintetizado se mezcló con diisocianato de isoforona (IPDI) en relaciones molares OH:NCO de 1:3, 1:4, 1:5, utilizando etil metil cetona (EMC) como disolvente (5mL). Los componentes se llevaron a 70 °C y se mezclaron continuamente durante 30 min. Posteriormente la mezcla se vertió en moldes de silicón de 8 cm x 4.5 cm (largo x ancho), que se secaron durante aproximadamente 14 días. Por último, las láminas de PU se cortaron en dimensiones específicas para la prueba mecánica.

Los poliuretanos obtenidos se caracterizaron por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier de acuerdo con la metodología descrita anteriormente.

Las propiedades de compresión se evaluaron de acuerdo con la metodología descrita por Acuña *et al.* (2021), utilizando un texturómetro modelo EZ-SX (Shimadzu, Maryland, U.S.A.) siguiendo la norma ASTM D1621 con un tamaño de muestra de 5 cm x 5 cm x 3 cm y una velocidad de 3 mm/min.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El polirol sintetizado con las condiciones descritas presentó un índice de acidez de 12.63 mg KOH/g (Tabla 1), valor mayor al observado en la grasa avícola utilizada como materia prima. Este aumento en el índice de acidez comprueba la presencia de hidrógenos ácidos, es decir, grupos hidroxilo (OH) en el producto de reacción correspondientes al polirol.

Por otra parte, la cuantificación del número de hidroxilos (OHN) para el polirol fue de 70 mg KOH/g, valor cercano a la predicción del modelo descrito por Ramírez (2023) que fue de 78 mg KOH/g. Comparando los valores del número de hidroxilo con otras investigaciones que producen polioles a partir de grasas vegetales, los valores de número de hidroxilo obtenidos en este estudio son menores (Tabla 1).

**Tabla 1**

*Índice de acidez y número de hidroxilos del polirol a partir de grasa de pollo y polioles a partir de aceites vegetales (Shen et al. 2019)*

Muestra	Índice de acidez (mg KOH/g)	Número de hidroxilo (mg KOH/g)
Materia prima (grasa de pollo)	0.89	-
Polirol de grasa de pollo	12.63	70
Polirol de aceite de soya	-	150.4
Polirol de aceite de linaza	-	190.8
Polirol de aceite de oliva	-	190
Polirol de aceite semilla de uva	-	270
Polirol de aceite de salvado de arroz	-	232

Esta diferencia de resultados puede deberse a tres factores; en primer lugar, a que los aceites vegetales utilizados para este fin tienen porcentajes mayores de ácidos grasos poliinsaturados en sus triglicéridos (Tabla 2), por lo tanto, existe mayor probabilidad de que esos dobles enlaces generen mayor cantidad de grupos hidroxilo (Marcano Serrano, 2008). Un segundo factor es que, en la reacción, algunos grupos hidroxilo formados en el triglicérido, se adicionaron nucleofílicamente a un grupo epóxido cercano, formando un grupo éter. Por otra parte, las reacciones colaterales asociadas a la apertura del anillo causadas por los componentes presentes en la mezcla de reacción como el ácido acético, protones, perácido acético o peróxido de hidrógeno, generan compuestos no hidroxilados o con menor número de grupos hidroxilo, lo que generaría una menor cuantificación (Rangarajan, 1995).

**Tabla 2**

Porcentaje de ácidos grasos poliinsaturados de la grasa de pollo y diferentes aceites vegetales (Marcano Serrano, 2008)

Muestra	Ácido linoleico (%)	Ácido linolénico (%)
Grasa de pollo (este estudio)	17.834	1.180
Aceite de soya	53	8
Aceite de linaza	16	52
Aceite de oliva	6.3	0.3
Aceite de palma	52.1	7
Aceite de colza	14.5	11

Para estudiar la estructura del poliol, se identificaron los grupos funcionales presentes mediante ATR-FTIR (Figura 1). Las bandas observadas en el poliol de este trabajo son similares a las observadas por Ionescu *et al.* (2011) donde prepararon polioles de poliésteres mediante esterificación a partir de aceite de ricino y de poliésteres petroquímicos (ácido adípico y dietilenglicol).

La banda de  $3432.30\text{ cm}^{-1}$  se asigna a los grupos hidroxilo, mientras que las bandas a  $2922.63\text{ cm}^{-1}$  y  $2853.90\text{ cm}^{-1}$  se asignan al estiramiento simétrico en fase C-H. La banda intensa aguda de  $1739.90\text{ cm}^{-1}$  es característica del carbonilo de éster, la banda en  $1460.27\text{ cm}^{-1}$  se asigna a la flexión asimétrica del C-H y las bandas a  $1097.56\text{ cm}^{-1}$  y  $1159.31\text{ cm}^{-1}$  al estiramiento simétrico y asimétrico del C-O-C.

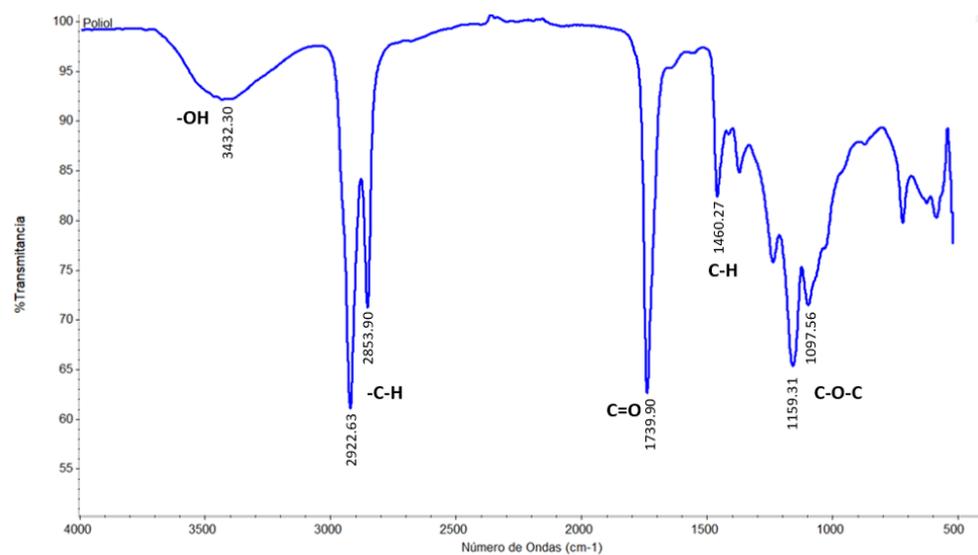


Figura 1. Espectro de FTIR de poliol a partir de grasa de pollo

Por otra parte, al evaluar los espectros de FTIR (Figura 2) de los poliuretanos sintetizados se observa que (relación molar OH/NCO 1:3, 1:4 y 1:5) no está presente la banda de la señal  $2270\text{ cm}^{-1}$ , asociada a la vibración de estiramiento del grupo  $\text{N}=\text{C}=\text{O}$  del IPDI, lo que indica que todos los grupos isocianatos reaccionaron durante la polimerización con los polioles. También se observa en los espectros de los PU una banda centrada en  $3350.63\text{ cm}^{-1}$ ,  $3351.95\text{ cm}^{-1}$  y  $3341.13\text{ cm}^{-1}$  respectivamente, que se atribuyó al estiramiento del N-H del grupo uretano, ésta se hace más intensa a medida que aumenta el contenido de isocianato en el material, debido a una mayor formación de grupos uretano. Además, se pudieron observar dos bandas en la región de la amida II asignada a la vibración de estiramiento de C-N junto con la vibración en el plano del enlace N-H, presentes en el producto de relación molar 1:3 a  $1644.74\text{ cm}^{-1}$  y  $1552.68\text{ cm}^{-1}$ ; en el de relación molar 1:4 a  $1643.27\text{ cm}^{-1}$  y  $1554.00\text{ cm}^{-1}$  y para la relación 1:5 a  $1640.79\text{ cm}^{-1}$  y  $1552.89\text{ cm}^{-1}$ . Esta banda también se hace más intensa con el aumento del contenido de isocianato, debido a que existe mayor participación de los grupos uretano.

Se pudieron apreciar las bandas en  $1734\text{ cm}^{-1}$  atribuido al estiramiento del carbonilo de los grupos éster ( $\text{C}=\text{O}$ ). Esto resultados nos indican que el IPDI reaccionó completamente con los hidroxilos del poliol y produjo el poliuretano (Chen *et al.*, 2021; Dai *et al.*, 2020; Mathew *et al.*, 2017).

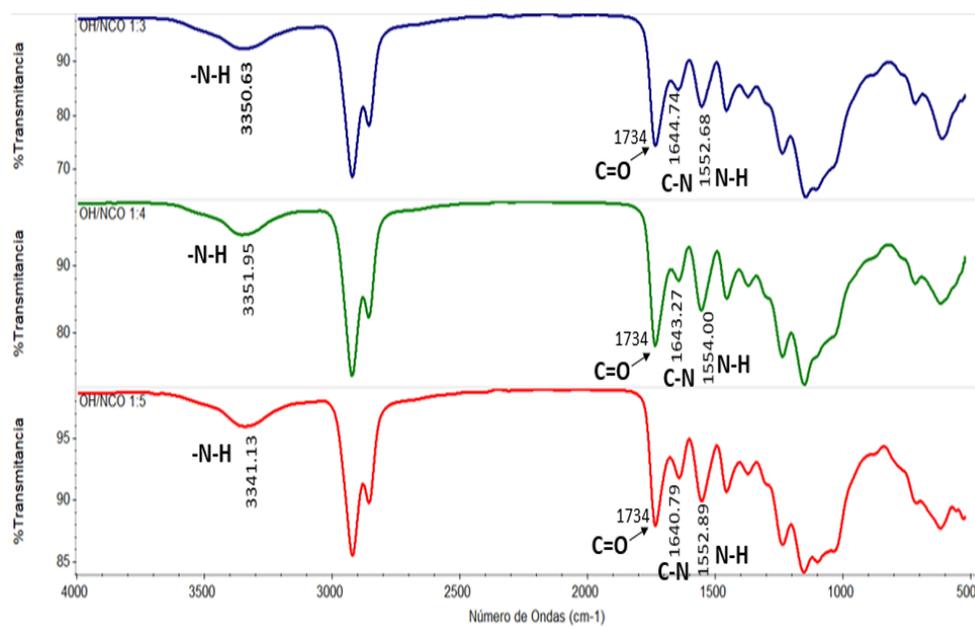


Figura 2. Espectro de FTIR de los poliuretanos obtenidos a diferentes relaciones molares de los grupos OH/NCO

La elevada reactividad del grupo isocianato con los compuestos activos de hidrógeno puede explicarse por las siguientes estructuras de resonancia (Figura 3):

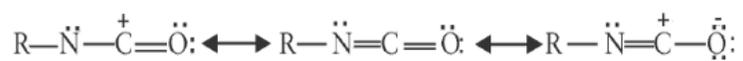


Figura 3. Estructuras canónicas generadas por el efecto de resonancia del grupo isocianato

La densidad de electrones es mayor en el átomo de oxígeno, mientras que el átomo de carbono tiene la menor densidad de electrones, haciendo que el átomo de carbono tenga una carga positiva y el oxígeno o el nitrógeno una carga negativa dependiendo de la estructura canónica que se trate.

La reacción de los isocianatos con los compuestos activos de hidrógeno (OH), es una adición en el doble enlace carbono–nitrógeno (Figura 4). Esta reacción se da de la siguiente manera: el centro nucleófilo de los compuestos activos de hidrógeno, es decir, el átomo de oxígeno de los grupos hidroxilo o los átomos de nitrógeno en el caso de las aminas, ataca nucleofílicamente al átomo de carbono electrófilo y el hidrógeno se añade al átomo de nitrógeno de los grupos -NCO. Los grupos que quitan los electrones aumentan la reactividad de los grupos -NCO y, por otra parte, los grupos donares de electrones disminuyen la reactividad frente a los compuestos activos de hidrógeno (Ionescu, 2016).

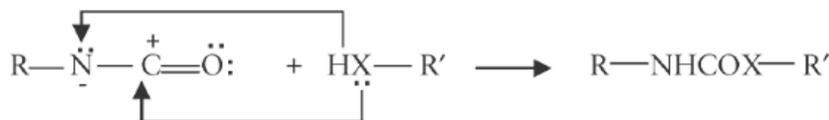


Figura 4. Mecanismo de reacción del grupo isocianato con compuestos activos de hidrógeno

Con el fin de evaluar el efecto de la relación molar OH/NCO en la formulación de los poliuretanos, se realizó la prueba mecánica de compresión.

De las tres muestras generadas, la muestra de PU con relación molar 1:3 (OH/NCO) no cumplió con los requerimientos para realizar el método de compresión, debido a que el material obtenido fue un material que se hidrataba fácilmente lo que lo hacía no manejable, impidiendo la cuantificación, mientras que los poliuretanos preparados a partir de la relación molar 1:4 y 1:5 de OH/NCO fueron espumas sólidas por lo que fue posible realizar la determinación. Nguyen Dang *et al.*, (2016) menciona que a mayor relación OH/NCO, mayor será el aumento de los segmentos duros, generando mayor entrecruzamiento en la polimerización del PU.

La figura 5 y 6 muestran los gráficos de la fuerza ejercida en Newton (N) y el desplazamiento del material (mm), parámetro descrito como rigidez, que es una medida cuantitativa de la oposición a las deformaciones

elásticas a causa de una fuerza o un esfuerzo. Para el material obtenido con la relación 1:4 (OH/NCO) tuvo un desplazamiento de 15.478 mm aplicando una fuerza de 400.753 N, por lo que la rigidez resultante fue de 25.89 N/mm, mientras que para el poliuretano obtenido con una relación 1:5 (OH/NCO) aplicando la misma fuerza se desplazó 9.652 mm por la que la rigidez fue de 41.52 N/mm. Esto indica que a una menor relación 1:4 (OH/NCO), la rigidez fue menor, en comparación con el PU con relación 1:5 (OH/NCO). Este resultado puede deberse a que en el PU 1:5 hay mayor cantidad de grupos isocianato que generan mayores entrecruzamientos con el poliol, lo que genera una mayor oposición a la deformación en comparación con el PU obtenido con la relación 1:4.

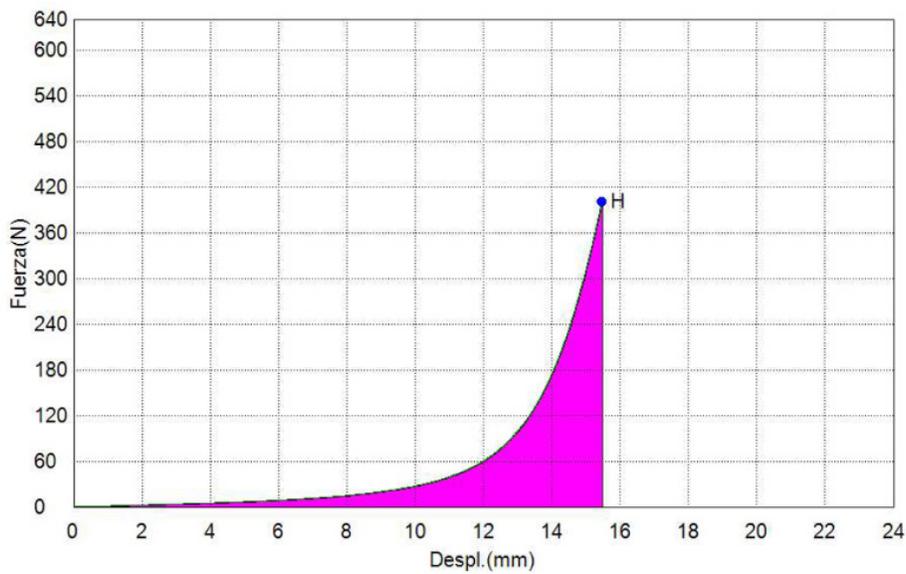


Figura 5. Rigidez del poliuretano generado con la relación molar 1:4 (OH/NCO)

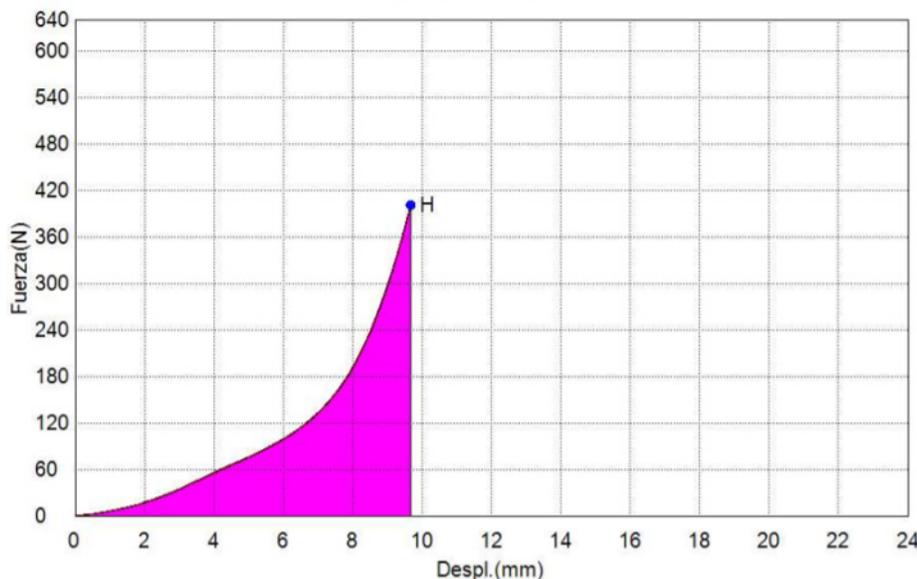


Figura 6. Rigidez del poliuretano generado con la relación molar 1:5 (OH/NCO)

Este mismo comportamiento se observa en la cuantificación de la resistencia a la compresión, observándose mayor valor para el material generado con la relación 1:5 ( $0.4152 \pm 0.003$  MPa) en relación con el obtenido con la relación 1:4 ( $0.2589 \pm 0.001$  MPa).

La resistencia a la compresión de los poliuretanos de grasa de pollo se compararon con la investigación de Acuña *et al.*, (2020) (Tabla 3) quienes prepararon espumas rígidas de poliuretano a base de aceite de ricino con propiedades retardantes de llama y alta capacidad de aislamiento. Prepararon PU a partir del polirol de aceite de ricino (BIO1), PU a partir de aceite de ricino con tensoactivos y agentes espumantes (BIO2) y PU a partir de aceite de ricino con tensoactivos y propiedades retardantes de llama (BIO2/EG).

La espuma BIO1 obtuvo baja resistencia a la compresión, debido a que presentaba una estructura porosa y celdas grandes, lo que favoreció la fragilidad de las paredes celulares. Al modificar el polirol con un tensoactivo, la resistencia de compresión aumentó, debido a que la viscosidad aumentó por la interacción de la mayor cantidad de grupos OH del polirol de base biológica con los grupos isocianatos, mejorando la estructura de la red, generando celdas más cerradas y el aumento de la densidad de reticulación.

Cuando se adiciona el agente retardante de llamas, la resistencia a la compresión disminuyó, provocando mala adhesión interfacial, dañando las paredes celulares y la integridad de la espuma. Por esta razón los valores de compresión obtenidos en este trabajo son mayores a los poliuretanos de base biológica con aditivos confirmando la presencia de una mezcla homogénea en la polimerización.

**Tabla 3**

*Resistencia a la compresión de PU a partir de grasa de pollo, aceite de ricino y de origen fósil*

Muestras	Resistencia a la compresión (MPa)
PU1:4 a partir de grasa de pollo (Este trabajo)	0.2589±0.001
PU1:5 a partir de grasa de pollo (Este trabajo)	0.4152±0.003
BIO1 a partir de aceite de ricino (Acuña, 2020)	0.071
BIO2 a partir de aceite de ricino (Acuña, 2020)	0.146
BIO2/EG a partir de aceite de ricino (Acuña, 2020)	0.112
Espuma de PU a basa de petróleo (Li <i>et al.</i> , 2015)	0.137 – 0.310

Comparando los valores de resistencia a la compresión con los de espumas de poliuretano generadas a partir del petróleo se observa que el PU 1:4 y los obtenidos con aceite de ricino se encuentran dentro del rango obtenido para el PU a base de petróleo, mientras que el PU 1:5 es mayor, demostrándose que es posible obtener espumas de poliuretano a partir de polioles de grasa de pollo con propiedades similares a las de una espuma a base de petróleo.

El escalamiento del proceso de producción de poliuretanos a partir de grasa avícola revela la búsqueda de materiales sostenibles y respetuosos con el medio ambiente. Sin embargo, la factibilidad de este proceso para su explotación comercial depende de varios factores clave que deben considerarse cuidadosamente como la cantidad y calidad de la grasa avícola, la inversión para la optimización del proceso, la evaluación de los costos asociados con la producción, el análisis del mercado para competir en precio y calidad con los poliuretanos convencionales, y la evaluación del impacto ambiental en su producción.

## CONCLUSIONES

Los polioles de grasa de pollo generados por epoxidación e hidrólisis *in situ* fueron apropiados para la formulación de biopoliuretanos, ya que la cantidad de números de hidroxilos del polirol y la relación molar de NCO utilizado favoreció la polimerización de la síntesis de PU, por lo que, los espectros de FTIR indicaron la formación del PU, lo cual nos indicó que los grupos hidroxilos habían reaccionado con el grupo NCO formando los puentes de hidrógeno.

La relación molar OH/NCO es de suma importancia para la síntesis de PU, ya que de ello dependen sus propiedades mecánicas, a mayor valor de hidroxilo se generarán productos más flexibles, y un mayor valor de NCO se generarán productos menos dúctiles y más rígidos.

## REFERENCIAS

- AOCS Te 1a-64 (2009). Método de prueba estándar para la determinación de valor ácido de ácidos grasos comerciales.
- Acuña, P., Zhang, J., Yin, G., Liu, X., & Wang, D. (2020). Bio-based rigid polyurethane foam from castor oil with excellent flame retardancy and high insulation capacity via cooperation with carbon-based materials. *Journal of Materials Science*, 56(3), 2684–2701. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05125-0>
- Ang, K., Lee, C., Cheng, S., & Chuah, C. (2014). Synthesis of palm oil-based polyester polyol for polyurethane adhesive production. *Journal of Applied Polymer Science*, 131 (6), 1–8. <https://doi.org/10.1002/app.39967>
- Bayer, O., Siefken, W., Rinke, H., Orthner, L., Schild, H. (1937). A process for the production of polyurethanes and polyureas. German Patent DRP 728981.
- Calvo-Correas, T., Santamaria-Echart, A., Saralegi, A., Martin, L., Valea, Á., Corcuera, M. A., & Eceiza, A. (2015). Thermally-responsive biopolyurethanes from a biobased diisocyanate. *European Polymer Journal*, 70, 173–185. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.07.022>
- Chen, S., Yang, M., Han, Y., Liu, H., & Zou, H. (2021). Hydrophobically modified sustainable bio-based polyurethane for controllable release of coated urea. *European Polymer Journal*, 142, 110114. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.110114>
- Dai Z., Jiang, P., Lou, W., Zhang, P., Bao, Y., Gao, X., Xia, J., & Haryono, A. (2020). Preparation of degradable vegetable oil-based waterborne polyurethane with tunable mechanical and thermal properties. *European Polymer Journal*, 139, 109994. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109994>
- Daneshvar, S., Behrooz, R., Najafi, S., & Sadeghi, G. (2019). Characterization of polyurethane wood adhesive prepared from liquefied sawdust by ethylene carbonate. *Bioresources*, 14(1), 796-815. <https://doi.org/10.15376/biores.14.1.796-815>
- Fu, Q., Long, Y., Gao, Y., Ling, Y., Qian, H., Wang, F., & Zhu, X. (2019). Synthesis and properties of castor oil based plasticizers. *RSC Advances*, 9(18), 10049–10057. <https://doi.org/10.1039/c8ra10288k>
- Galeano L., & Guapacha M. (2011). *Aprovechamiento y caracterización de los residuos grasos del pollo para la producción de un biocombustible*. Tesis Químico Industrial, Universidad Tecnológica de Pereyra.
- Hernández-Cruz, M. (2015). Tesis de Maestría. *Modificación de la viscosidad de grasa de pollo-biodiesel con aditivos, para la formulación de biolubricantes*. Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

- Ionescu, M., Ji, Y., Shirley, W., & Petrović, Z.** (2011). Polyurethanes from hybrid vegetable oil/petrochemical polyester polyols. *ACS Symposium Series*, 1063, 73–93. <https://doi.org/10.1021/bk-2011-1063.ch005>
- Ismail, E., Motawie, A., & Sadek, E.** (2011). Synthesis and characterization of polyurethane coatings based on soybean oil–polyester polyols. *Egyptian Journal of Petroleum*, 20(2), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2011.06.009>
- Jayavani, S., Sunanda, S., Varghese, T., & Nayak, S.** (2017). Synthesis and characterizations of sustainable polyester polyols from non-edible vegetable oils: Thermal and structural evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 162, 795–805. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.040>
- Kasprzyk, P., & Datta, J.** (2019). Novel bio-based thermoplastic poly (ether-urethane). Correlations between the structure, processing and properties. *Polymer*, (160) 1–10, <https://doi.org/10.1016/J.POLYMER.2018.11.032>.
- Marcano-Serrano, M.** (2008). “Obtención de Poliols a Partir de Aceites Vegetales para la Fabricación de Poliuretano”. *Tesis de Licenciatura*. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.
- Mathew, A., Kurmvanshi, S., Mohanty, S., & K. Nayak, S.** (2017). Influence of structure-property relationship on the optical, thermal and mechanical properties of castor oil based transparent polyurethane for catheter applications. *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 54(11), 772–781. <https://doi.org/10.1080/10601325.2017.1332468>
- Narine, S., Yue, J., & Kong, X.** (2007). Production of polyols from canola oil and their chemical identification and physical properties. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 84(2), 173–179. <https://doi.org/10.1007/s11746-006-1021-5>
- Nguyen Dang, L., Le Hoang, S., Malin, M., Weisser, J., Walter, T., Schnabelrauch, M., & Seppälä, J.** (2016). Synthesis and characterization of castor oil-segmented thermoplastic polyurethane with controlled mechanical properties. *European Polymer Journal*, 81, 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.05.024>
- Purwanto, E.** (2010). The Synthesis of Polyol from Rice Bran Oil (RBO) through epoxidation and hydroxylation reactions. *Tesis de Maestría*, 73–74. Universidad de Adelaida.
- Rangarajan, B., Havey, A., Grulke, E., Culnan, P.** (1995). Kinetic parameters of a two-phase model for in situ epoxidation of soybean oil. *Journal of the American Oil Chemist's Society*, 72, 10, 1161–1169. <https://doi.org/10.1007/BF02540983>
- Ramírez, Y., Meza, R., Luján, M., Castañón, H.** (2023) Tesis de Maestría. Biopoliuretanos a partir de residuo avícola. Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

- Rojas-González, A., & Girón-Gallego, E. (2011).** Variables de operación en el proceso de transesterificación de grasas animales: Una revisión. *Ingeniería y Universidad*, 15(1), 197–218. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=So12321262011000100011&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=So12321262011000100011&lng=en&nrm=iso).
- Rosnah, S., Min, M., Ahmad, A., Mansor, A., & Tiankhoon, L. (2016).** Preparation and characterization of Jatropha oil-based Polyurethane as non-aqueous solid polymer electrolyte for electrochemical devices. *Electrochimica Acta*, 222, 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.10.173>
- Salimon, J., Abdullah, B., Yusop, R., & Salih, N. (2014).** Synthesis, reactivity and application studies for different biolubricants. *Chemistry Central Journal*, 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/1752-153X-8-16>
- Shen, Y., He, J., Xie, Z., Zhou, X., Fang, C., & Zhang, C. (2019).** Synthesis and characterization of vegetable oil based polyurethanes with tunable thermomechanical performance. *Industrial Crops and Products*, 140, 111711. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111711>
- Valero, M., Pulido, J., Ramírez, Á., & Cheng, Z. (2008).** Síntesis de poliuretanos a partir de polioles obtenidos a partir del aceite de higuera modificado por transesterificación con pentaeritritol. *Química Nova*, 31(8), 2076–2082. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000800031>.
- Zhang, C., Ding, R., & Kessler, M. (2014).** Reduction of epoxidized vegetable oils: A novel method to prepare bio-based polyols for polyurethanes. *Macromolecular Rapid Communications*, 35(11), 1068–1074. <https://doi.org/10.1002/marc.201400039>
- Zhang, C., Madbouly, S., & Kessler, M. (2015).** Biobased polyurethanes prepared from different vegetable oils. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 7(2), 1226–1233. <https://doi.org/10.1021/am5071333>
- Ziegłowski, M., Trosien, S., Rohrer, J., Mehlhase, S., Weber, S., Bartels, K., Siegert, G., Trellenkamp, T., Albe, K., & Biesalski, M. (2019).** Reactivity of isocyanate-functionalized lignins: a key factor for the preparation of lignin-based polyurethanes. *Frontiers in Chemistry*, 7:562. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00562>

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (México) por la beca otorgada a YRR (998227), al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Tuxtla Gutiérrez por el apoyo financiero al proyecto (14162.22P); al Dr. Daniel Castañeda y a la Dra. Teresa Ayora Talavera del CIATEJ-Unidad Mérida por la determinación de la resistencia a la compresión y rigidez.