



Cien Años de Química Macromolecular

One Hundred Years of Macromolecular Chemistry

David Salgado-Chavarría¹ y Joaquín Palacios-Alquisira¹

Recepción: 2020-08-13

Aceptación: 2020-09-03

Resumen

El año pasado, la Química Macromolecular celebró su primer centenario. En 1920, el químico orgánico Hermann Staudinger, publicó su célebre artículo *Über Polymerisation* (Sobre Polimerización), proponiendo la existencia de largas cadenas de muy alto peso molecular, en las cuales los átomos se mantienen juntos por medio de uniones químicas covalentes. En el transcurso de estos 100 años, la Química de los Polímeros ha avanzado rápidamente, siendo reconocida hoy como una de las ramas más activas en investigación, desarrollando nuevos productos útiles con una amplia gama de aplicaciones.

Este trabajo trata sobre aspectos relevantes de la historia de la Química Macromolecular. Se mencionan algunos de los nombres de los investigadores más importantes que ayudaron a desarrollar esta ciencia durante el siglo XX y también se nombran algunos de los profesores que iniciaron la enseñanza de los polímeros en México, específicamente en la Universidad Nacional Autónoma México (UNAM).

Palabras clave

Historia de la Química, Química Macromolecular, Polímeros.

Abstract

Last year, Macromolecular Chemistry celebrated its first centenary. In 1920, the organic chemist Hermann Staudinger, published his famous article *Über Polymerisation* (On Polymerization), proposing the existence of long chains of very high molecular weight, in which atoms are held together through covalent chemical bonding. Over the course of these 100 years, Polymer Chemistry has advanced rapidly, being recognized nowadays as one of the most active branches in research, developing new useful products with a wide range of applications.

This work deals with relevant aspects of the history of Macromolecular Chemistry. Some of the most important names of researchers who helped developing this science during the 20th century are mentioned and here are also appointed some of the professors who started teaching about polymers in Mexico, specifically at Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Keywords

History of Chemistry, Macromolecular Chemistry, Polymers.

¹Laboratorio de Físicoquímica Macromolecular, Posgrado Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Contacto: polylab1@unam.mx

Los Primeros Descubrimientos

Las macromoléculas¹ o polímeros, como se conocen en el ambiente industrial, han sido parte de los materiales que ha utilizado la humanidad desde tiempos inmemoriales, pues las macromoléculas naturales como: la madera, resinas de árboles, hule, cáñamo, sisal (fibras de henequén), la celulosa en plantas y las fibras vegetales naturales como el algodón y también la seda, han servido eficazmente al desarrollo de las civilizaciones.

Con el desarrollo acelerado de la Química, especialmente en el siglo XIX, se obtuvieron por primera vez, en laboratorios europeos de Alemania y Francia, materiales gomosos y viscosos, cuyas disoluciones tenían una muy alta viscosidad, formaban películas y mostraban buenas propiedades físicas y podían emplearse como sustitutos de otros materiales. Ese fue el caso de la resina de nitrato de celulosa (Figura 1), que sustituyó al marfil en las bolas de billar (Craver y Tess, 1975). Posteriormente, el nitrato de celulosa fue sustituido debido a que cuando se encuentra seco, es explosivo y puede encenderse con calor, chispas o fricción (Wei, *et al.*, 2017).

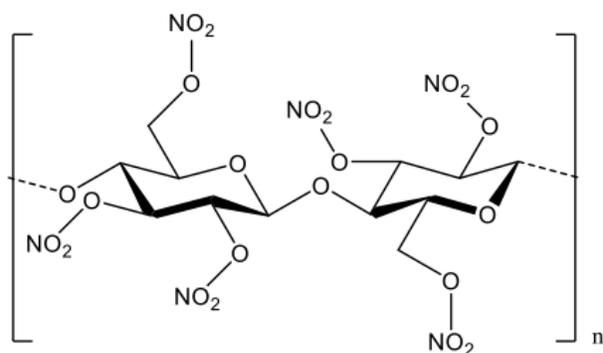


Figura 1. Unidad Repetitiva del Nitrato de Celulosa.

En 1907, en los Estados Unidos, Leo Baekeland (Strom y Rasmussen, 2011) preparó el primer polímero sintético comercialmente disponible, llamado Baquelita,² a partir de los monómeros,³ fenol y formaldehído, con buenas propiedades, baja densidad y baja conductividad eléctrica (Baekeland, 1909). Por estas características la Baquelita (Figura 2), además de tener aplicaciones en la industria eléctrica, también se emplea extensamente en la fabricación de bolas de billar.

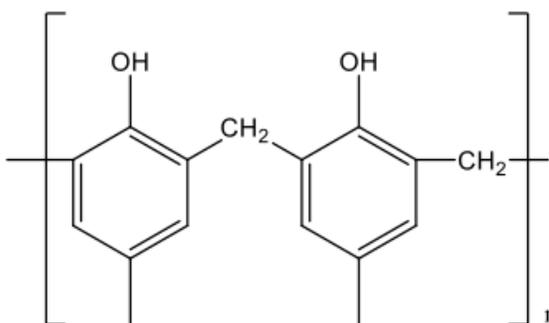


Figura 2. Unidad Repetitiva de la Baquelita.

¹ Moléculas de alta masa molecular relativa, cuya estructura comprende esencialmente la repetición múltiple de unidades derivadas, real o conceptualmente, de moléculas de baja masa molecular relativa (McNaught y Wilkinson, 1997).

² Primer polímero sintético que se produjo a gran escala industrial.

³ Moléculas sencillas que reaccionan para producir macromoléculas.

Las macromoléculas, tanto las naturales como las naturales modificadas químicamente, empezaron a emplearse ampliamente, pues ofrecían una alternativa novedosa y útil para aplicaciones como textiles, plásticos, gomas, hules, pinturas y adhesivos.

Surge entonces el interés científico por conocer mejor tanto la composición química microestructural, como la conformación morfológica, así como la relación microestructural y las propiedades únicas de estos nuevos materiales. Así, en Alemania a finales del siglo XIX, Emil Fischer estudió proteínas aisladas y azúcares para establecer sus fórmulas básicas y concluyó que esas moléculas eran grandes pero que su peso molecular llegaba hasta valores de orden de 4×10^3 [g/gmol]. Fischer, se inclinó por la Teoría de Asociación de Moléculas Sencillas como base para explicar el comportamiento atípico de sistemas poliméricos de alta viscosidad,⁴ propiedades mecánicas buenas, así como elasticidad.

En el efervescente ambiente científico de los años 20 del siglo pasado, los más prestigiados químicos orgánicos, se opusieron al concepto de macromolécula, como E. Fischer, quien estaba convencido de que las cadenas de alto peso molecular no podían exceder los 4×10^3 [g/gmol] de peso molecular, así que fue difícil la introducción y la aceptación del concepto de macromolécula que hoy conocemos (Craver y Tess, 1975).

Tiempo atrás, fue Jacob Berzelius quien introdujo el término Polímero en el lenguaje científico en 1833, pues él reconoció que dos sustancias o compuestos pueden tener la misma composición química pero diferente peso molecular (DuBois, 1972). Berzelius en sus proyectos no trabajó con macromoléculas, sin embargo, se interesó por el problema de los polímeros de alto peso molecular.

Volvamos al siglo XX. En la década de los años 20, no existía en ese momento una teoría que explicara el concepto de macromolécula, con solidez suficiente, para que la comunidad científica lo aceptara. Como se mencionó antes, la Teoría de la Asociación de Moléculas Sencillas se consideraba suficiente; este hecho retrasó la aparición de la Química Macromolecular como una nueva rama de la Química, pues se pensaba que las características de los polímeros se podían explicar considerando su naturaleza coloidal.⁵ La mayoría de los químicos de la época aceptaban plenamente la Teoría de la Asociación que está basada en los trabajos de Thomas Graham, quien concluyó que las sustancias pueden existir en estado coloidal bajo condiciones controladas, así como pueden también estar en el estado gaseoso, líquido o sólido (Craver y Tess, 1975).

Otros químicos como Michael Polanyi y el joven austriaco Herman Mark, trabajaron con la teoría y la técnica de difracción de rayos X, aplicada al estudio de las fibras textiles como la seda, el algodón y la celulosa (madera) y encontraron que son macromoléculas, cuyas celdas cristalinas se repiten (Mark, 1976).

Hermann Staudinger

Fue entonces que en 1920, Hermann Staudinger (Staudinger, 1912; Staudinger, 1920), un profesor distinguido del Instituto Politécnico de Zúrich, lanzó la Teoría Macromolecular, que propone la existencia de largas cadenas de muy alto peso molecular, en las cuales los átomos se mantienen juntos por medio de uniones químicas covalentes. Unos años más tarde, Hermann Staudinger comprobó su teoría por medio de las reacciones de polimerización, que son las que producen cadenas largas de monómeros unidos de forma covalente. Staudinger midió la viscosidad de materiales poliméricos en disolución y aplicó las ecuaciones propuestas por Einstein en su Tesis Doctoral.

Sobre la viscosidad de disoluciones, H. Staudinger logró establecer la función que relaciona la viscosidad intrínseca con el peso molecular del polímero (Ecuación 1).

⁴ Propiedad fisicoquímica que representa la resistencia interna de un fluido al movimiento o la "fluidez".

⁵ Coloide: Forma de agregación molecular microheterogénea con partículas dispersas.

$$[\eta] = KM_{vis}^a \quad (1)$$

En su seminario de despedida del Instituto Tecnológico de Zúrich, el Dr. Staudinger presentó y discutió, con sus colegas y alumnos, su nuevo concepto de moléculas gigantes que tienen forma de largas cadenas rígidas como cilindros. En esos momentos muchos colegas no aceptaban todavía las nuevas ideas, sin embargo él se mantuvo firme defendiendo su Teoría Macromolecular diciendo: *"Esa es mi opinión y no tengo otra explicación"*, refiriéndose al comportamiento de los sistemas poliméricos.



Figura 3. Hermann Staudinger

Más tarde, cuando Staudinger ya estaba instalado en la Universidad de Freiburg, Alemania, asistió y participó en un simposio organizado para seguir la discusión del concepto de macromolécula. El evento se llevó a cabo en Dusseldorf, Alemania, en septiembre de 1926. El primer expositor intentó refutar la teoría de Staudinger, refiriéndose a los polímeros como pseudosustancias de muy alto peso molecular, ante esto, la respuesta del profesor Staudinger, se basó en el hecho experimental de las muy altas viscosidades de las disoluciones poliméricas. Hoy reconocemos que la viscosidad de una disolución aumenta con el peso molecular del soluto y con la concentración del mismo y disminuye con un aumento considerable en la temperatura.

En esa misma reunión Herman Mark (Mark, 1940), científico austriaco que entonces trabajaba en Alemania, presentó un trabajo sobre el análisis cristalográfico por Rayos X de la celulosa y concluyó diciendo que hay moléculas muy grandes que son más largas que una celda elemental o sea que pueden participar en varias celdas, unidades o cristales. Aunque las observaciones de Mark no probaban definitivamente la Teoría Macromolecular, apoyaron las ideas de Staudinger. Más tarde, el profesor Mark convencido plenamente de la existencia de las macromoléculas, consideró, a diferencia de Staudinger, que las macromoléculas tenían la forma de madejas, en vez de cilindros rígidos. Mark prefirió identificarlas en su forma con madejas casi esféricas debido a las rotaciones alrededor de las uniones covalentes.

Así, con sus trabajos pioneros en Química Macromolecular, Staudinger ganó el Premio Nobel en Química en 1953 (Patterson, 2014), logrando el reconocimiento pleno de una ciencia



Figura 4. Wallace Carothers

llamada hoy Ciencia de los Polímeros, la cual se ha desarrollado de manera espectacular, con un número de publicaciones muy elevado, de tal manera que se ha dado origen a la fundación, y siguen fundándose, *Journals* dedicados a la difusión de los nuevos conocimientos tanto teóricos como tecnológicos en esta área ahora tan importante de la Química.

Wallace Carothers

La prueba experimental contundente de la existencia de moléculas gigantes se pudo obtener con los experimentos de Svedberg en 1927 donde, empleando una centrifuga potente, que él diseñó, logró separar diferentes fracciones de una muestra, cada una con un peso molecular distinto (Svedberg y Pedersen, 1940). Otra prueba importante y definitiva de la existencia de macromoléculas,

se ve en los trabajos de Wallace Carothers en 1930, quien en la compañía DuPont USA, logró preparar polímeros a partir de monómeros por medio de reacciones de policondensación (Carothers, 1931). Sus trabajos introdujeron a la sociedad nuevos y sorprendentes materiales en forma de fibras que hoy todos usamos en la vida cotidiana. Uno de sus mayores descubrimientos fue el Nylon 6,6 (Figura 5), una poliamida usada ampliamente en la industria textil, elaboración de alfombras y en piezas moldeadas por inyección, entre otras (McIntyre, 2005).

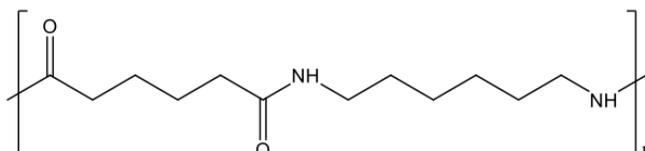


Figura 5. Unidad Repetitiva del Nylon 6,6.

En otra conferencia científica celebrada en Cambridge, Inglaterra y organizada por la *Faraday Society* del 26 al 28 de septiembre de 1935, a la cual asistieron invitados de honor como: Hermann Staudinger, Kurt Meyer, Herman Mark, J. R. Katz y W. Carothers (Patterson, 2012), las actitudes de rechazo y desconfianza hacia la Teoría Macromolecular habían cambiado radicalmente, pues en esa reunión W. Carothers reportó sus trabajos de síntesis de nuevos polímeros. Ahora el debate se centró no en la existencia de moléculas gigantes, sino en la microestructura, propiedades y aplicaciones de las mismas. No se habló más del concepto de macromoléculas, sino, en cómo prepararlas y estudiarlas.



Figura 6. Paul J. Flory

Paul J. Flory

En 1937 llegó a la Compañía DuPont, Paul J. Flory, a quien se contrató para trabajar en los estudios teóricos de las reacciones de polimerización. Flory fue asignado al grupo de investigación del Dr. Carothers.

Paul Flory rápidamente se integró al proyecto, dando buenos resultados desde los primeros meses. Sus actividades de investigación incluyeron los procesos de formación y obtención de polímeros, como también sus propiedades en masa y en disolución. Se orientó hacia la descripción del tamaño y forma de las macromoléculas que son solubles, logró establecer relaciones muy importantes entre su estructura química y sus propiedades físicas. Introdujo los conceptos de volumen excluido,⁶ temperatura theta⁷ (θ), parámetro de interacción,⁸ también modificó las ecuaciones clásicas de las disoluciones y explicó el comportamiento característico de los sistemas poliméricos en disolución (Flory, 1941; Flory, 1942; Flory y Krigbaum, 1950).

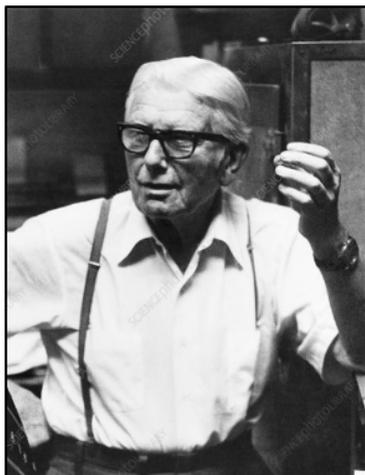
Flory pasó después al ambiente académico en la Universidad de Cornell, donde escribió su obra clásica *Principles of Polymer Chemistry* (Flory, 1953). En la Universidad de Stanford, siguió investigando entre 1961 y 1976, y en ese último año fue nombrado Profesor Emérito por su incansable trabajo tanto de investigación como docente. También, en el año de 1974, fue galardonado con el Premio Nobel de Química, por sus estudios teóricos y prácticos, en la

⁶ Se refiere a la idea de que un segmento de cadena, no puede ocupar el mismo espacio de otro.

⁷ Temperatura a la cual las moléculas de polímero en disolución se comportan casi idealmente.

⁸ Describe la interacción entre el disolvente y las moléculas de polímero. Se emplea como un criterio de miscibilidad.

fisicoquímica de macromoléculas. Paul J. Flory, formó a muchos científicos, uno de ellos Maurice L. Huggins (Huggins, 1942), que colaboraron con él para desarrollar sus ideas y quienes continuaron con la tarea importante de dar fundamentos teóricos sólidos a la nueva Ciencia de Polímeros.



Chicago, Cleveland, Carolina del Norte y Michigan.
Figura 7. Herman Mark

Herman Mark

Mientras tanto, el Dr. Herman Mark, se trasladó desde Austria a América, donde trabajó primero en Canadá para una industria papelera. Después, decidido a retornar al ámbito académico, empezó una muy brillante carrera en Brooklyn.

En los primeros años de su nueva vida en la Ciudad de Nueva York, fue asignado a proyectos militares ya que eran los años de la Segunda Guerra Mundial.

Después, se dedicó incansablemente a la docencia e investigación. Algunos años más tarde, recibió apoyo completo para la fundación del *Polymer Research Institute* (PRI), donde se formaron muchos de los pioneros de la educación en Ciencia de Polímeros, estableciéndose en importantes universidades en Chicago, Cleveland, Carolina del Norte y Michigan. Ahí florecieron los centros de investigación que confirman su labor que amplió los conocimientos en polímeros.

Herman Mark, siempre impulsó la introducción en los programas de educación, con asignaturas relacionadas con polímeros para nivel de licenciatura (Mark, 1976). Su propuesta no ha sido aceptada del todo, ya que la enseñanza de la Química Macromolecular se imparte solamente en los programas de Maestría y Doctorado.

Debido a su incansable labor educativa en el PRI, Mark logró atraer a estudiantes de muchos países como: Gran Bretaña, Francia, Italia, Unión Soviética, Japón, Israel e India, ellos fueron los difusores importantes de la Ciencia de Polímeros. Podemos mencionar a varios profesores muy importantes como: Turner Alfrey, Herbert Morawetz, Charles Overberger, Gerald Oster, Murray Goodman, Paul Doty, Bruno Zimm, Frederick Eirich, Robert Simha, Arthur Tobolsky y Eli Pearce. Todos ellos trabajaron después en diferentes universidades e industrias, generando más conocimientos básicos y tecnológicos que fueron claves para el desarrollo mundial de la Química Macromolecular.

El fuerte impacto del PRI en la educación en Ciencia de Polímeros se debió a que implementó un enfoque global pues, se enseñó tanto química, bioquímica, fisicoquímica e ingeniería de los sistemas macromoleculares; esta visión es tan amplia que abarca desde la preparación, la caracterización, la producción a escala industrial y el procesado de los materiales, para satisfacer y crear nuevas necesidades de productos útiles en las actividades cotidianas.

En grandes complejos industriales como: DuPont, Phillips Petroleum, Rohm and Haas, Shell, The Dow Chemical Company, que dominan el campo, como también en grandes compañías productoras de hules y siliconas, se desarrollaron muchos programas para investigar y producir polímeros.

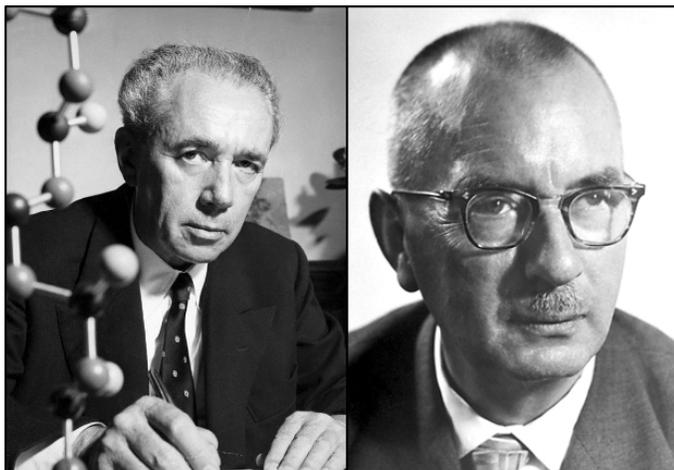


Figura 8. Giulio Natta (izquierda) y Karl Ziegler (derecha).

Giulio Natta y Karl Ziegler

Al mismo tiempo, en las décadas que abarcan los años 40 y 50 del siglo XX, en Europa, en países como Italia y Alemania también estaban trabajando en el estudio de los polímeros y sus tecnologías para fabricarlos a gran escala.

En Italia, el profesor Giulio Natta (Natta, 1964), se interesó profundamente en el campo de polímeros, hules, fibras y plásticos, y colaboró extensamente con otro investigador europeo, el alemán Karl Ziegler (Ziegler, 1964), quien había desarrollado nuevos catalizadores de

titanio (Figura 9) y zirconio, Natta los probó con gran éxito en la polimerización del propileno (Figura 10), obteniendo macromoléculas con alta estereorregularidad en su microestructura, llamados polímeros estereorregulares, que tienen buenas propiedades mecánicas y térmicas.

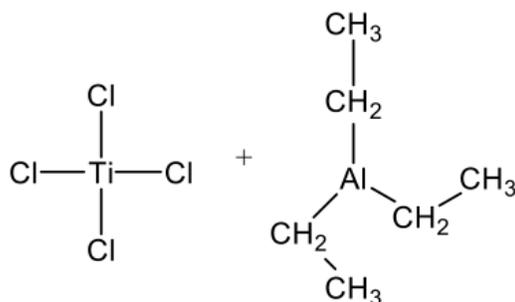


Figura 9. Catalizador de Ziegler y Natta de Titanio.

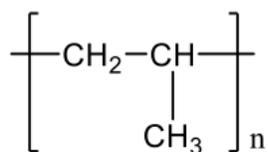


Figura 10. Unidad Repetitiva del Poli(propileno).

El empleo de los catalizadores de Ziegler y Natta permiten el control preciso en el acomodo en el espacio de las moléculas de monómeros, algo considerado casi imposible en esos días, pero que era deseado para preparar también moléculas con propiedades de alta especificidad biológica. Por sus exitosas investigaciones en estereoquímica macromolecular, obtuvieron el Premio Nobel de Química en 1963.

Inicio de la Ciencia de Polímeros en México

En México, especialmente en la UNAM, el estudio de los sistemas de polímeros sintéticos empezó alrededor de 1950 (Garritz y Mateos, 2015).

El profesor Julio Terán Zavaleta, ofreció a los estudiantes de las carreras de Química e Ingeniería Química un curso teórico-práctico muy completo sobre macromoléculas (Palacios, 2009). En sus lecciones también presentaba demostraciones de algunos fenómenos físicos y químicos relacionados con las propiedades de los polímeros.

Pocos años más tarde, sus alumnos, los profesores Helio Flores Ramírez y Héctor Sobol Zaslav, en los laboratorios de investigación de la naciente División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Química, hicieron trabajos de investigación sobre la síntesis y caracterización de materiales poliméricos.

Los doctores Enrique Campos López y José Juan Morales, fueron otros distinguidos profesores de la Facultad de Química. Dentro de sus investigaciones se encuentran: la determinación de la microestructura del hule del guayule (Campos-López y Palacios, 1976), la termo-oxidación de hules naturales por calorimetría diferencial de barrido (Ponce-Vélez y Campos-López, 1978) y el estudio de las resinas de fenol-formaldehído para usarse en procesos de fundición de metales (Tapia, 1974). Ambos profesores se formaron en el extranjero y abrieron y definieron el campo de las macromoléculas, participando activamente en los programas de Maestría y Doctorado en Química y Fisicoquímica de los polímeros. Más tarde, sus alumnos continuaron desarrollando el campo junto con investigadores jóvenes del recién creado Centro de Materiales, hoy Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM-UNAM).

Importancia de la Química Macromolecular

Probablemente no seamos conscientes pero, al menos en el mundo natural, las macromoléculas siempre han estado en nuestras vidas: almidón, celulosa, hule natural, lana, entre otros. No los notamos, pero los polímeros nos acompañan en todo momento: nuestras prendas de vestir están hechas a partir de poliéster, poliamida y algodón. Muchos de los recipientes donde cocinamos nuestros alimentos, están recubiertos con teflón, poli(tetrafluoroetileno), incluso, los coches se han vuelto más eficientes debido a que nuevos materiales poliméricos, más ligeros, se han empleado.

Debido a las múltiples aplicaciones que tienen los polímeros y a su versatilidad, es difícil imaginar a la sociedad sin ellos y de acuerdo con Namazi (2017), la industria de estos materiales ha crecido tan rápido que incluso es más grande que las industrias de cobre, acero y aluminio. Según datos de PlasticsEurope (2019), en el año 2018, se produjeron mundialmente 359 millones de toneladas métricas de plásticos, sin incluir a las fibras de poli(tereftalato de etileno) ni a las fibras de poliamidas.

La Tabla 1, muestra datos sobre la producción de plásticos durante el año 2012 en los Estados Unidos (Fried, 2014) y durante los años de 2012 y 2018 en Europa (PlasticsEurope, 2013, 2019).

Tabla 1. Producción de algunos plásticos en Estados Unidos y Europa.

	Estados Unidos (2012)	Europa (2012)	Europa (2018)
Plásticos	Miles de toneladas métricas		
Polietileno de baja densidad (LDPE) y polietileno lineal de baja densidad (LLDPE)	11,221	8,032	8,960
Polietileno de alta densidad (HDPE)	8,046	5,508	6,246
Poli(propileno) (PP)	7,405	8,629	9,881

El análisis comparativo puede realizarse solamente para Europa, donde hubo un aumento en la producción de todos los plásticos presentados en la Tabla 1. Para LDPE y LLDPE, hubo un

aumento del 11.55%, mientras que para el HDPE y el PP, los incrementos fueron del 13.39% y 14.50%, respectivamente.

Papel Actual de la Ciencia de los Polímeros

La Ciencia de Polímeros es reconocida hoy como una de las ramas más activas en investigación básica y aplicada, desarrollando nuevas tecnologías y nuevos productos útiles con una amplia gama de aplicaciones.

El éxito extraordinario de los polímeros ha provocado su consumo excesivo, lo que ha generado una gran acumulación de los llamados plásticos de un solo uso. Las cualidades únicas de los polímeros, favorecieron la sustitución de otros materiales como los metales, el vidrio, la madera, cartón y papel, por productos poliméricos que ofrecen importantes ventajas en propiedades y aplicaciones de alto consumo.

El problema de la acumulación de polímeros ha crecido de manera alarmante, lo que ha obligado a los gobiernos a controlar y prohibir el uso de algunos plásticos.

Se trata de reducir el grave problema de la acumulación de materiales poliméricos en el medio ambiente a través de la disminución en el consumo (reducir), junto con el uso repetitivo de los materiales (reutilizar), y el extensivo reciclado (reciclar), mediante la implementación obligatoria de los procesos de reciclado mecánico, de reciclado químico y de recuperación de la energía acumulada en las macromoléculas por medio de la incineración.

En la Ciencia de los Polímeros y Materiales, contamos con conocimientos que nos permitirán resolver en los próximos años esta gran crisis de acumulación. Mientras tanto, se sigue investigando sobre los sistemas de las macromoléculas, tanto naturales como sintéticas, para seguir ofreciendo resultados útiles para solucionar los problemas globales.

Referencias

- Baekeland, L. H. (1909). The Synthesis, Constitution, and Uses of Bakelite. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1(3), 149-161. <https://doi.org/10.1021/ie50003a004>
- Campos-López, E. y Palacios, J. (1976). Microstructure of Natural Guayule Rubber from 300-MHz Nuclear Magnetic Resonance Spectra. *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition*, 14(6), 1561-1563. <https://doi.org/10.1002/pol.1976.170140625>
- Carothers, W. H. (1931). Polymerization. *Chemical Reviews*, 8(3), 353-426. <https://doi.org/10.1021/cr60031a001>
- Craver, J. K. y Tess, R. W. (1975). *Applied Polymer Science*. Washington, USA: The American Chemical Society.
- DuBois, J. H. (1972). *Plastics History U.S.A.* Boston, USA: Cahnners Books.
- Flory, P. J. (1941). Thermodynamics of High Polymer Solutions. *The Journal of Chemical Physics*, 9(8), 660-661. <https://doi.org/10.1063/1.1750971>
- Flory, P. J. (1942). Thermodynamics of High Polymer Solutions. *The Journal of Chemical Physics*, 10(1), 51-61. <https://doi.org/10.1063/1.1723621>
- Flory, P. J. (1953). *Principles of Polymer Chemistry*. Ithaca, USA: Cornell University Press.

- Flory, P. J. y Krigbaum, W. R. (1950). Statistical Mechanics of Dilute Polymer Solutions. II. *The Journal of Chemical Physics*, 18(8), 1084-1094. <https://doi.org/10.1063/1.1747866>
- Fried, J. R. (2014). *Polymer Science & Technology*. New Jersey, USA: Pearson Education, Inc.
- Garritz, A. y Mateos, J. L. (2015). *Historia de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México. Su Primer Siglo: 1916-2016*. Ciudad de México, México: Comité Editorial de la Facultad de Química.
- Huggins, M. L. (1942). Theory of Solutions of High Polymers. *Journal of the American Chemical Society*, 64(7), 1712-1719. <https://doi.org/10.1021/ja01259a068>
- Mark, H. F. (1940). *Physical Chemistry of High Polymeric Systems*. New York, USA: Interscience.
- Mark, H. F. (1976) Polymer Chemistry: The Past 100 Years. *Chemical and Engineering News*, 54(15), 176-189. <https://doi.org/10.1021/cen-v054n015.p176>
- McIntyre, J. E. (2005). *Synthetic Fibers: Nylon, Polyester, Acrylic, Polyolefin*. Boca Raton, USA: CRC Press LLC.
- McNaught, A. D. y Wilkinson A. (1997). *IUPAC. Compendium of Chemical Terminology*. Oxford, England: Blackwell Scientific Publications.
- Namazi, H. (2017). Polymers in Our Daily Life. *Bioimpacts*, 7(2), 73-74. <https://doi.org/10.15171/bi.2017.09>
- Natta, G. (1964). Von der Stereospezifischen Polymerisation zur Asymmetrischen Autokatalytischen Synthese von Makromolekülen Nobel-Vortrag am 12. Dezember 1963. *Angewandte Chemie*, 76(13), 553-566. <https://doi.org/10.1002/ange.19640761303>
- Palacios, J. (2009). La Industria de los Plásticos de Ingeniería en México. Caso Nylamid, Poli(amidas) PA6, PA12, PA6/12. *Boletín de la Sociedad Química de México*, 3(1), 25-29.
- Patterson, G. (2012). *A Prehistory of Polymer Science*. Heidelberg, Germany: Springer.
- Patterson, G. (2014). *Polymer Science From 1935-1953. Consolidating the Paradigm*. Heidelberg, Germany: Springer.
- PlasticsEurope (2013). *Plastics – The Facts 2013. An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data*. Recuperado el 09 de Agosto de 2020, de https://www.plasticseurope.org/application/files/7815/1689/9295/2013plastics_the_facts_PubOct2013.pdf
- PlasticsEurope (2019). *Plastics – The Facts 2019. An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data*. Recuperado el 09 de Agosto de 2020, de https://www.plasticseurope.org/application/files/1115/7236/4388/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf
- Ponce-Vélez, M.A. y Campos-López, E. (1978). The Thermal Oxidation of Guayule and Hevea Rubbers by Dynamic Differential Scanning Calorimetry. *Journal of Applied Polymer Science*, 22(9), 2485-2497. <https://doi.org/10.1002/app.1978.070220908>
- Staudinger, H. (1912). *Die Ketene*. Stuttgart, Deutschland: F. Enke.
- Staudinger, H. (1920). Über Polymerisation. *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft (A and B Series)*, 53, 1073. <https://doi.org/10.1002/cber.19200530627>
- Strom, E. T. y Rasmussen, S. C. (2011). *100+ Years of Plastics. Leo Baekeland and Beyond*. USA: American Chemical Society.

- Svedberg, T. y Pedersen, K. O. (1940). *The Ultracentrifuge*. London, England: Oxford University Press.
- Tapia, A. (1974). *Contribución al Estudio de las Resinas Fenol-Formaldehído para el Recubrimiento de las Arenas de Fundición para su Uso en el Proceso Shell Molding* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Wei, R., He, Y., Liu, J., He, Y., Mi, W., Yuen, R. y Wang, J. (2017). Experimental Study of Nitrocellulose with Different Structures. *Materials*, 10(3), 316. <https://doi.org/10.3390/ma10030316>
- Ziegler, K. (1964). Folgen und Werdegang Einer Erfindung Nobel Vortrag am 12. Dezember 1963. *Angewandte Chemie*, 76(13), 545-553. <https://doi.org/10.1002/ange.19640761302>