

Aportaciones para la enseñanza de la química con orientación a la ecología y el desarrollo sustentable.

El color verde predomina en el futuro de la Química *

Juan Méndez Vivar**

Abstract (Green color domains the future of chemistry)

One of the current main concerns of our society is the preservation of the environment. Recently there have been proposed new chemical processes that constitute outstanding approaches that take into account the conservation of the environment as a priority. This paper describes briefly some of those processes and encourages to individuals and institutions related to the chemical area to join efforts in that direction.

Introducción

Una de las primeras llamadas de atención hacia el cuidado de los recursos naturales fue el famoso libro de Rachel Carson sobre el abuso de los pesticidas y su impacto en los ecosistemas en EEUU (Carson, 1962). A partir de entonces, las observaciones sobre el deterioro ambiental se han hecho más frecuentes (Méndez Vivar, 2003). La Reunión Cumbre de Montreal (Canadá) en 1987 también se puede considerar como otro antecedente importante de la toma de conciencia colectiva a nivel internacional de los peligros que representan para el medio ambiente algunos compuestos químicos, tales como los cloro-fluorocarburos, empleados en el pasado principalmente como gases refrigerantes y que al ser liberados en la atmósfera llegan a reaccionar con el ozono estratosférico, destruyendo la capa que protege a nuestro planeta de la radiación cósmica. De esta manera inició el reto por eliminar estos y otros compuestos nocivos. Posteriormente, en la Reunión Cumbre de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente y desarrollo realizada en Río de Janeiro (Brasil) en 1992 se proclamó que el desarrollo sostenible debe ser el principio fundamental para el avance de la economía

mundial, estableciendo que todos los seres humanos "tienen derecho a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza". En la Reunión Cumbre de Kyoto (Japón) en 1997 se abordó el problema del calentamiento global de nuestro planeta (relacionado con el incremento del efecto invernadero) debido a la emisión de gases de combustión. La tendencia ha continuado, y en el año 2000 la Organización de las Naciones Unidas (ONU) elaboró un tratado para erradicar el uso de 12 contaminantes orgánicos persistentes. Estas reuniones han sido algunos de los antecedentes más importantes que han conducido a los investigadores químicos a buscar alternativas en los procesos de síntesis, de tal forma que se mantenga un equilibrio entre las actividades humanas y la conservación de la naturaleza. Este conjunto de estrategias se denominan "Química Verde" y están induciendo a la comunidad química a visualizar su actividad de una manera aún más responsable.

¿Por qué verde?

Los activistas que luchan por la conservación del medio ambiente han adoptado desde hace varios años el color verde en sus campañas (la organización Greenpeace, por ejemplo), probablemente porque el color verde (proveniente de manera natural de la clorofila) es representativo de la naturaleza, como lo reflejan en general los árboles y las plantas. La asociación de la química al color verde se refiere en general al desarrollo de procesos químicos en armonía con la naturaleza. Así, la denominada "Química Verde" se conoce también como "Química Sostenible" y se puede definir como el diseño, desarrollo e implementación de productos químicos y los procesos con que se producen con el fin de reducir o eliminar la producción de sustancias peligrosas para la salud de la especie humana y el medio ambiente. El poder de la química verde radica en que su enfoque empieza a nivel molecular y tiene como finalidad desarrollar procesos que no alteren el medio ambiente. Para lograr los objetivos que se persiguen con esta nueva

** Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Depto. de Química, A. P. 55-534 México, D. F. 09340 México. E-mail: jmv@xanum.uam.mx

*Recibido: 8 de septiembre de 2004. Aceptado: 7 de diciembre de 2004

visión de la química, es necesaria la participación de varios sectores: el sector educativo formal y los medios de comunicación masiva, los investigadores en institutos y universidades (biólogos, químicos, ingenieros y científicos de otras disciplinas), los gobiernos, las industrias y las organizaciones no gubernamentales (ONG), entre otros. También es importante un enfoque nuevo de la educación hacia la conservación del medio ambiente, de tal manera que se promueva un desarrollo sostenible.

El campo de acción

Industria farmacéutica

Existen varios ejemplos que ilustran el desarrollo de procesos químicos alternativos para la producción de fármacos. Uno de ellos es la producción del antidepresivo sertralina, cuyo nombre comercial es Zoloft (PfizerMR). Brevemente descrito, el proceso se inicia con la formación de una imina en presencia de cloruro de titanio $TiCl_4$ (ver Fig. 1). A continuación, la imina se reduce con paladio soportado en carbón, produciéndose una mezcla de isómeros cis y trans, de la cual se separa el mandelato de sertralina empleando ácido D-mandélico. Finalmente, la sertralina se obtiene como una sal en presencia de ácido clorhídrico (HCl). En el proceso original se contemplaba el empleo de los disolventes tolueno, tetrahydrofurano, cloruro de metileno y hexano; sin embargo se encontró que se podían sustituir por etanol, el cual es un disolvente inofensivo, a diferencia de los anteriores. Por otro lado, la hidrogenación con paladio soportado en carbonato de calcio en lugar de carbón, empleando etanol como disolvente produjo rendimientos más altos del isómero importante. A escala industrial los cambios mencionados significan una reducción a la décima parte del volumen de disolvente empleando, por tonelada de sertralina producida. Por supuesto, esto se refleja en una reducción considerable de los costos de producción (Rouhi, 2002).

Otro ejemplo de la implementación de alternativas para obtener fármacos es la producción de un anticancerígeno denominado Taxol o Paclitaxel (Bristol-MyersMR). Este compuesto surgió en la década 1960 como un compuesto con actividad antitumoral, derivado de una planta en Estados Unidos durante un programa del Instituto Nacional de Cáncer (NCI). El Taxol se aisló originalmente a partir de la corteza de un árbol de la familia de las gimnospermas

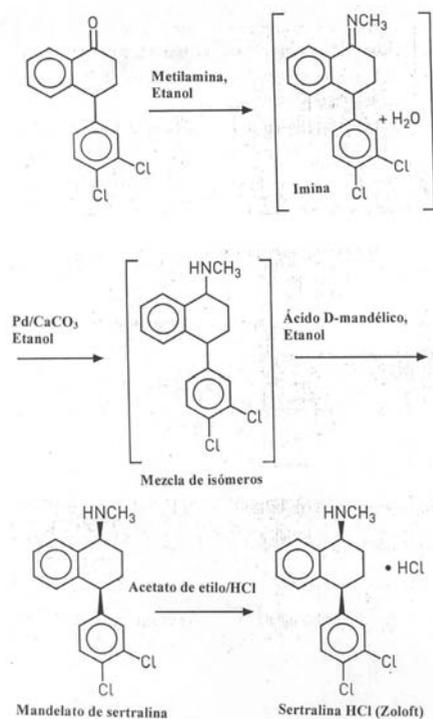


Fig. 1. Esquema de la secuencia de reacciones para obtener sertralina empleando etanol como disolvente.

(*Taxus brevifolia*), que tarda 200 años en desarrollarse completamente. Aunque esta ruta no era factible económica ni ecológicamente, en la década 1980 se realizaron las primeras pruebas clínicas y en 1991 Bristol-Myers, asociado con NCI intentó desarrollar comercialmente el fármaco. El siguiente candidato fue otro árbol (*Taxus baccata*) que crece en Europa y del cual se empleaban las hojas y ramas en lugar de la corteza. Como el proceso tampoco resultó ser adecuado, se recurrió a la tecnología desarrollada por Phyton Inc.MR, que consiste en un proceso de fermentación a partir de "callos" (grupos de células cultivadas inicialmente en cajas de Petri) de las agujas de un árbol que crece en China (*Taxus chinensis*) a partir del cual se aísla el Taxol de un caldo de fermentación y se purifica por cromatografía y cristalización. Una de las ventajas más importantes del nuevo proceso es que el número de disolventes empleados en la separación se redujo de 15 a cinco. Además, se ahorra gran cantidad de energía al eliminar etapas de reacción criogénicas o de baja temperatura y etapas de secado. Después de realizar estos

cambios se obtiene como un beneficio adicional un aumento del rendimiento, que alcanza un valor de 87%, comparado con el valor reportado en el proceso inicial, que es de 68% (ver Tabla 1). A partir del año 2002, el Taxol se produce solamente mediante el método de cultivo de células y se usa actualmente para el tratamiento de cáncer de ovario, de mama y de los pulmones. Este proceso "verde" recibió en este año el premio "Presidencial Green Chemistry Challenge Awards", el cual se otorga anualmente a partir de 1995 en Estados Unidos. El proceso participó en la categoría denominada "ruta sintética alternativa" (Ritter, 2004).

Requerimientos	Proceso previo	Proceso actual
Disolvente de reflujo	Benceno	Tolueno
Otros disolvente	Diclorometano, Acetato de etilo, Heptano, agua	Heptano, agua
Evaporación a sequedad	Si	No
Amina terciaria	Trietilamina	Diisopropiltriethylamina
Rendimiento	68%	87%

Tabla 1. Ventajas de la sustitución de benceno por tolueno en la ruta de preparación del anticancerígeno Taxol.

Materiales mesoporosos

Un material mesoporoso es aquél que tiene cavidades y poros en el intervalo de 2 a 5 nm (1 nm = 1 x 10⁻⁹m). Tales materiales se pueden considerar análogos a las zeolitas, las cuales son materiales microporosos (poros con diámetro inferior a 2 nm). La estrategia química para obtener materiales mesoporosos es la llamada "Química supramolecular", según la cual las moléculas se pueden organizar en estructuras definidas sin formar enlaces covalentes, sino más bien interacciones débiles tales como la formación de puentes de hidrógeno o las interacciones hidrofóbicas. Un ejemplo de estas últimas son las moléculas que contienen un grupo polar en un extremo (la cabeza) y una cadena orgánica larga no polar (la cola), las cuales forman micelas en medios acuosos polares. El mejor ejemplo de los materiales que forman micelas son los detergentes (Fig. 2a). Las micelas se forman porque las cadenas orgánicas repelentes al agua se juntan en el centro de una esfera, o en algunos casos de un cilindro para evitar el contacto

con el agua (Fig. 2b). Entonces, los grupos polares de las cabezas de las moléculas forman una capa en la superficie de la esfera o cilindro, formando una barrera entre las colas de hidrocarburo y el agua (Fig. 2c). Estos materiales se perfilan como fuertes candidatos para ser empleados como catalizadores altamente selectivos (Macquarrie, 2001).

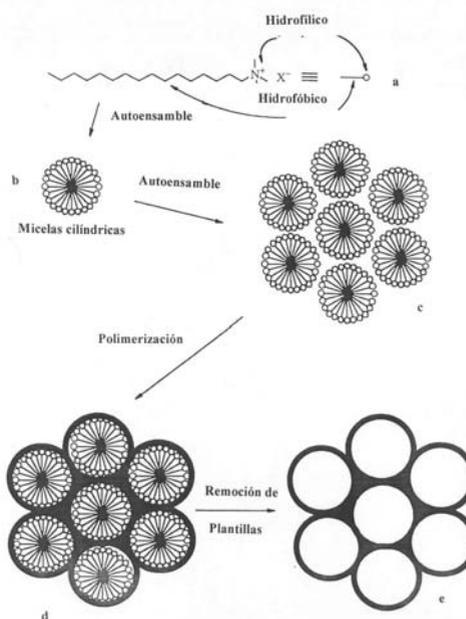


Fig. 2. a) molécula de una sal cuaternaria de amonio, b) formación de una micela cilíndrica, c) autoensamble de micelas, d) polimerización de los precursores de Si y Al en la superficie de las micelas, e) obtención de un sólido poroso por eliminación de las micelas.

El diámetro de las micelas depende de las dimensiones de los agentes surfactantes, aunque generalmente varían entre 2 y 4 nm, que son las dimensiones requeridas para los poros en catalizadores mesoporosos. Los primeros intentos por obtener ensambles supramoleculares de moléculas incluyeron sales cuaternarias de amonio con cadenas orgánicas largas como agentes formadores de micelas y se hicieron reaccionar precursores de Si y Al en condiciones similares a las empleadas en la producción de zeolitas (Fig. 2d). Posteriormente las micelas se eliminaban por calcinación para obtener sólidos porosos (Fig. 2e). El tamaño de los poros formados depende del diámetro de las micelas que sirven como una especie

de plantillas durante la formación del sólido poroso. Así, un sólido obtenido empleando como agente tensoactivo y formador de plantillas el dodecil trialquilamonio (C12) tendrá un diámetro de poro de aproximadamente el doble de la longitud del dodecil trialquilamonio, aproximadamente 2.2 nm. Conforme disminuye la longitud de la cadena de las moléculas tensoactivas, se llega a un punto en que éstas no forman micelas. Esto ocurre para el caso en que la cadena se compone de ocho átomos de carbono, por lo que los poros más pequeños que se pueden obtener por este método tienen un diámetro de aproximadamente 1.8 nm. Por otro lado, las moléculas más largas que producen micelas son las que contienen 18 átomos de C, produciendo poros con un diámetro de 3.7 nm aproximadamente. Las cadenas de longitudes mayores no producen micelas, ya que son totalmente insolubles.

En aquellos casos en que se desea obtener sólidos con poros de mayor diámetro se pueden emplear moléculas hidrofóbicas tales como el mesitileno (trimetilbenzeno) introduciéndolas en las micelas para producir una expansión del área de la micela y consecuentemente un diámetro de poro mayor (Fig. 3).

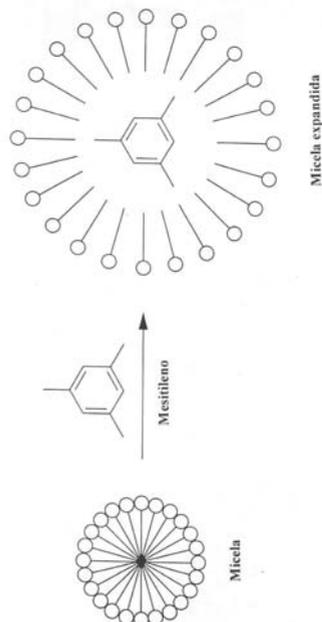


Fig. 3. Expansión de una micela por introducción de una molécula de mesitileno.

Procesos basados en biomasa

El término biomasa se refiere a cualquier material orgánico que se presenta en la naturaleza en forma renovable. Esta definición incluye a las cosechas y a los árboles en general y también a sustancias como los carbohidratos (azúcares, almidones y celulosa), aceites vegetales y proteínas. Según los líderes en el campo, la tecnología basada en la biomasa podría transformar una cosecha de maíz en prendas de vestir o una carga de soya en una montaña de espuma de poliuretano o un pastizal en alcohol etílico (Wedin, 2004).

La producción de compuestos químicos a partir de recursos renovables no es una idea nueva. De hecho, hasta los inicios del siglo XX la mayoría de los productos químicos provenían de recursos renovables. Basta citar como ejemplo la producción de los primeros plásticos, cuya materia prima en algunos casos era la caseína (una proteína de la leche), la gutapercha extraída del árbol *Palaquium*, (originario de Malasia) o el hule natural obtenido del árbol *Hevea brasiliensis* (Méndez-Vivar, 1998). Sin embargo, a partir del éxito y el dramático crecimiento de la industria petroquímica en el siglo XX, la producción de compuestos químicos obtenidos a partir de biomasa se redujo a aproximadamente 5% en la época actual.

Los desarrollos científicos y técnicos en biotecnología, que incluyen enzimas, biocatálisis, ingeniería genómica y metabólica están empezando a desplazar la balanza hacia el aprovechamiento de la materia prima renovable. Los aspectos económicos y del medio ambiente pueden acelerar esta tendencia. Por lo menos, en los Estados Unidos de América los comités federales de alto nivel sugieren que la producción de sustancias químicas a partir de suministros de biomasa aumentarán rápidamente pasando del 5% actual a 12% en el año 2010, a 18% en 2020 y que alcanzarán el 25% en 2030. Algunas compañías que están invirtiendo en el área son BASFMR, BayerMR, DegusaMR, DowMR, DuPontMR y ShellMR, entre otras.

El costo total de los productos derivados del petróleo incluye a los siguientes dos: uno relativamente alto de la materia prima y el otro relativamente bajo, del procesamiento. Debido a que este último es bajo, el mejoramiento de la tecnología no implicaría una disminución drástica en el costo total de los productos.

Por otro lado, en el caso de los productos obtenidos a partir de biomasa ocurre lo contrario, ya que el costo del procesamiento es relativamente alto y el costo de la materia prima es relativamente bajo. Por consiguiente, conforme se desarrollen tecnologías de proceso más eficientes, el costo total de estos productos se reducirá considerablemente. Aparte de los beneficios económicos, los productos obtenidos de biomasa contribuyen a la conservación del medio ambiente. Así, por ejemplo, las biorreacciones en solución acuosa generan menos contaminantes que las tecnologías basadas en el petróleo. Un beneficio potencial adicional de los nuevos productos es poder contar con una funcionalidad mejorada y un valor agregado más alto. Por ejemplo, la compañía DuPontMR dio a conocer una familia de polímeros llamada "Sorona", preparados a partir de 1,3-propanodiol cuyas propiedades tales como la resistencia a la deformación rivalizan con las de los plásticos PET (polietilenterftalato). El primer polímero disponible comercialmente es el Sorona 3GT que combina las mejores propiedades del poliéster y el "nylon", al mismo tiempo que minimiza algunos de los problemas de producción asociados con ambos. Aunque DuPont conocía las propiedades atractivas de estos polímeros desde hace más de 50 años, éstos solamente se hicieron viables comercialmente hasta ahora que se han desarrollado los procesos basados en biomasa para la producción del 1,3-propanodiol.

Las ventajas que representan los productos derivados de biomasa son vistas con muy buenos ojos en Europa, donde las diferentes ramas de la biotecnología se identifican con colores. Así, la biotecnología industrial se denomina "biotecnología blanca"; la "biotecnología verde" se relaciona con la agricultura y los alimentos, la "biotecnología roja" se refiere al cuidado de la salud y la "biotecnología negra" se relaciona con las armas biológicas y el llamado bioterrorismo.

Una de las primeras compañías productoras de polímeros obtenidos de biomasa es Cargill Dow LLCMR, ubicada en Blair, Nebraska EEUU. Entre sus productos están las fibras empleadas en la fabricación de cobijas y los plásticos empleados en la producción de empaques de comida. Los polímeros se obtienen a partir de granos de maíz cuyo procesamiento transforma el almidón del maíz a dextrosa, y, posteriormente, mediante un proceso de biorreac-

ción convierte la dextrosa en ácido láctico, el cual se condensa para formar el monómero láctido que, finalmente, se polimeriza para producir ácido poliláctico.

La asociación entre industrias e instituciones dedicadas a la investigación pueden acelerar el desarrollo de procesos basados en biomasa. Por ejemplo, la asociación de Cargill con el Centro de Investigación de Polímeros de Kansas (Kansas Polymer Research Center), con sede en la Universidad Estatal de Pittsburg dio como resultado la producción de diferentes tipos de espuma de poliuretano cuya flexibilidad depende del contenido de aceite de soya, variando éste entre 15 y 40% en peso para producir incluso material adecuado para asientos de automóviles.

Entre las oportunidades para desarrollar nuevos procesos, las que han recibido más atención por parte de la comunidad dedicada a la investigación están las siguientes:

- Desarrollo de tecnologías para procesar materiales celulósicos o lignocelulósicos. De esta manera se podrían procesar además de los granos de maíz, los tallos de la planta, las brácteas o "cáscaras" ("totomochtle", en náhuatl) de la mazorca y los olotes, es decir, todo el material lignocelulósico.

- Desarrollo de catalizadores, incluyendo los tradicionales, los enzimáticos y los microbianos, para transformar los carbohidratos o los aceites vegetales en otros compuestos químicos mediante conversiones estereoespecíficas en condiciones de reacción menos drásticas y generando subproductos menos tóxicos.

- Recuperación de compuestos químicos a partir de soluciones acuosas diluídas. Algunas áreas prometedoras incluyen la tecnología de membranas (la cual se detalla más adelante) y la extracción líquido-líquido.

- Desarrollo de biorrefinerías, las cuales aprovecharían todos los componentes de las materias primas renovables. Estas plantas producirían muchos de los compuestos actualmente obtenidos en las refinerías de petróleo (combustibles líquidos, compuestos orgánicos, etc.). Además, las biorrefinerías producirían alimentos y compuestos bioquímicos (Mullin, 2004).

Membranas inorgánicas porosas

El interés en este tipo de membranas empleadas en procesos de separación ha ido en aumento en la última década debido a que sus propiedades son muy específicas (Topuz, B. et al., 2004; Paul, D. R., y

Yampol'skii, Y. P., 1994) . Son químicamente estables, pueden resistir altas temperaturas y son indeformables. Estas propiedades las sitúan en un lugar privilegiado como una opción "verde" a nivel industrial. Actualmente, las membranas inorgánicas tienen gran aplicación en la industria de los alimentos y en biotecnología. Por ejemplo, en el caso de la industria lechera las membranas inorgánicas constituyen aproximadamente el 10% del mercado (Méndez-Vivar, 1996). Tradicionalmente las membranas orgánicas se han usado en la clarificación de jugos de frutas tales como jugo de manzana, arándano, toronja y kiwi; sin embargo, estos procesos adolecen de la pérdida de sabor del jugo durante la clarificación. Las ventajas tecnológicas que ofrecen las membranas inorgánicas son flujos más elevados y la adsorción mínima de proteínas. Además, los filtros inorgánicos se pueden esterilizar con vapor una vez que se montan en línea y se pueden limpiar a altas presiones y, a diferencia de su contraparte orgánica, no se compactan ni se hinchan. Estas propiedades, junto con su elevada resistencia mecánica y térmica las coloca un paso adelante de las membranas orgánicas. La filtración con membranas también se usa en muchos casos para la separación de células a partir de caldos de "fermentación", en la recuperación de proteínas y antibióticos y como soporte de enzimas y microorganismos.

El caso particular de la aplicación de las membranas inorgánicas a la separación de mezclas de gases es un reto para la investigación, ya que éstas deben satisfacer dos exigencias: una alta permeabilidad (flujo por unidad de diferencia de presión) y buena selectividad (dependiente de la uniformidad del tamaño de poro). Los mecanismos de transporte y separación en las membranas porosas son muy complejos e incluyen la difusión en la superficie, la condensación capilar y el tamizado molecular basado en la exclusión de tamaños (Fig. 4). Estos son algunos aspectos que se deben estudiar cuidadosamente para poder lograr aplicaciones económicamente atractivas, más refinadas y competitivas con los procesos actuales, como la separación de mezclas gaseosas a escala industrial (Mendoza-Serna, 2001).

Aunado al desarrollo a escala industrial, también se están realizando esfuerzos en el aspecto de educación en química. Así, en el otoño de 2001 la Universidad de Massachussets en Boston (Estados Unidos de

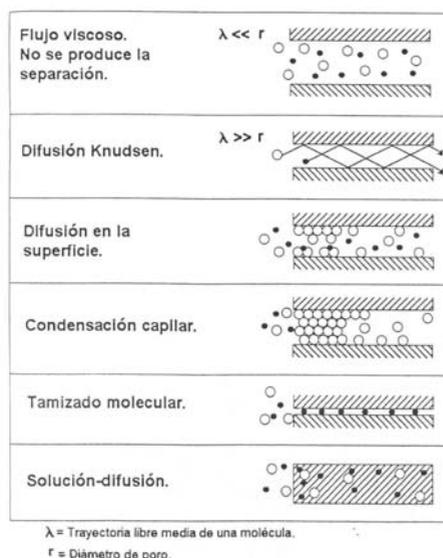


Fig. 4. Mecanismos de transporte en membranas inorgánicas empleadas en la separación de gases.

América) inició un programa de estudios de posgrado denominado "Doctorado en Química Verde" (Green Chemistry Ph.D.). Estos estudios se imparten en el Departamento de Ciencias del Medio Ambiente y está administrado por el Departamento de Química. Los estudios están enfocados principalmente al diseño de materiales y procesos que tienen un impacto nocivo mínimo en la salud humana y el medio ambiente. Los cursos que se incluyen en el plan de estudios son de toxicología, leyes y políticas del medio ambiente, química industrial, etc. Las áreas de concentración incluyen entre otros los siguientes aspectos: biodegradación, biorremediación, "monitoreo" (seguimiento monitorio) del medio ambiente, procesos de síntesis que preservan el medio ambiente, etc. Un aspecto importante en la formación de los estudiantes inscritos en este posgrado es que los aspectos considerados tradicionalmente importantes en las síntesis de compuestos orgánicos, tales como el rendimiento y la estereoselectividad pasan a segundo término, dándole prioridad al impacto de los productos en el medio ambiente y sus propiedades tóxicas.

Otras alternativas "verdes"

Los líquidos iónicos empleados como medios de reacción son una ruta alternativa importante con respecto a los disolventes orgánicos porque tienen presiones de

vapor muy pequeñas (no son volátiles), por lo que se pueden emplear repetidamente y se evita la producción de residuos. Un ejemplo es el líquido iónico que se obtiene en una sola etapa de síntesis a partir de la reacción entre formaldehído, n-butilamina, glioxal y ácido hexafluorofosfórico. El líquido iónico obtenido contiene al catión 1,3-di-n-butylimidazolio y el anión PF₆⁻ (Rouhi, 2002).

Existen formulaciones a base de enzimas que se están empleando en el reciclado de papel como una alternativa al uso de disolventes orgánicos, tradicionalmente usados para degradar y eliminar contaminantes que forman parte de la materia prima (adhesivos, tintas y otros aditivos), durante el proceso. Los contaminantes se deben eliminar ya que forman aglomerados pegajosos e hidrofóbicos que disminuyen la calidad del producto y ocasionan interrupciones del proceso de reciclado.

Recientemente se ha iniciado la producción de una nueva generación de pigmentos que contienen el grupo azo (formado por enlaces -N=N- que actúan como un puente que enlaza dos grupos aromáticos tales como fenilo), los cuales son menos tóxicos y tienen un impacto ambiental bajo con respecto a los colorantes tradicionales. Los contraiones que contienen estos pigmentos son los cationes calcio, estroncio y bario, que son menos nocivos que los cationes plomo, cromo y cadmio de los pigmentos inorgánicos tradicionalmente empleados (molibdato de plomo, PbMoO₄; cromato de plomo, PbCrO₄ o el sulfoseleniuro de cadmio, CdSe/CdS).

Perspectivas

A lo largo de este artículo se han descrito brevemente algunas estrategias químicas que pretenden mejorar algunos procesos de síntesis y recuperación, así como la implementación de tecnologías nuevas que están revolucionando la industria del siglo XXI. La misión de la Química como ciencia al servicio de la sociedad se refuerza con la iniciativa de los investigadores jóvenes y la experiencia de los investigadores reconocidos, así como con sus planteamientos responsables encaminados a lograr un desarrollo sostenido. En un futuro no muy lejano presenciaremos nuevas aportaciones resultantes de su creatividad e imaginación. Así pues, los químicos no se aburren, están innovando bajo la consigna de que "el color verde es sinónimo de vida".

Bibliografía

Carson, R. L., 1962. *Silent spring*. Houghton Mifflin, USA.

Macquarrie, D. J., Chemistry on the inside: Green chemistry in mesoporous materials. In *Chemistry and Life Science*, edited by J. M. Thompson, Cambridge University Press, UK. Pp. 59-74, 2001

Méndez Vivar, J., Agua, aire y tierra: elementos vulnerables frente al fuego. *Contactos*, No. 47, 20-27 (2003).

Méndez Vivar, J., Aplicaciones industriales de las membranas inorgánicas. *Contactos*, No. 14, 14-19 (1996).

Méndez Vivar, J., La revolución de los plásticos I. El surgimiento. *Contactos*, No. 26, 7-10 (1998).

Mendoza Serna, R., Membranas ultramicroporosas de silicato de titanio obtenidas a partir de polímeros inorgánicos para la separación de gases. Tesis Doctoral. UAM-Iztapalapa, Depto. De Química. p 141 (2001).

Mullin, R., Sustainable specialties. *Chemistry and Engineering News*, 82, 45, 29-35 (2004).

Paul, D. R., Yampol'skii, Y. P. editors, Polymeric gas separation membranes. CRC Press, USA (1994).

Ritter, S. K., Green Innovations. *Chemistry and Engineering News*, 82, 28, 25-30 (2004).

Rouhi, A. M., Green Chemistry for Pharma. *Chemistry and Engineering News*, 80, 16, 30-33 (2002).

Topuz, B., Çiftçio?lu, M., Özkan, F., Investigation of the permeability of pure gases in sol-gel derived Al₂O₃ membrane. *Key Engineering Materials*, 264-268, 399-402 (2004).

Wedin, R., Chemistry on a high-carb diet. *Chemistry*. Spring. American Chemical Society. 23-27 (2004).