

Química verde para la sostenibilidad

Pedro César Cantú-Martínez*

Hoy en día, según Sierra *et al.* (2014, p. 2), la ciencia de la química (CQ) tiene un rol “esencial desde la formación de la Tierra hasta prácticamente todos los aspectos de la vida diaria actual; está implicada en el aire que respiramos, el agua que tomamos, los plásticos que usamos, nuestras comidas, ropa y los edificios que habitamos”. De tal manera que “casi todo lo que utilizamos ha sido creado, influenciado, intensificado o preservado por la química” (Peiró, 2003, p. 7).

Es incuestionable que el desarrollo de la CQ ha provisto a la sociedad de muchas soluciones a las problemáticas relacionadas con la salud, alimentación y nuevos materiales (Mestres, 2013). Sin embargo, la CQ también está presente en el marco de las vicisitudes ambientales que nos aquejan. Se puede observar que, de forma paralela, en múltiples investigaciones, se ha puesto en evidencia que la CQ por un lado participa como generadora de estas problemáticas y por el otro se yergue en un rol sumamente importante para atenuar y restablecer las condiciones de estos escenarios alterados por la contaminación o pérdida de calidad ambiental (Pájaro y Olivero, 2011).

Lo anterior permite estar conscientes de que muchos de los descubrimientos e innovaciones en este campo disciplinar de la CQ han generado una mejora de la calidad de vida del ser humano; asimismo, han comprometido los recursos de los que disponemos (Kirchoff, 2005; Belloso, 2009), como consecuencia de las sustancias químicas vertidas al aire, suelo y agua, por los procesos productivos y generadores de bienes de consumo, cuyos efectos son sumamente impactantes con alcances de carácter global, particularmente acentuados a partir de la revolución industrial (Moeller, 2005).

En este sentido, la CQ ha tendido un reposicionamiento en el ámbito de la sustentabilidad, inclusive algunos autores la han concebido como una nueva ciencia con carácter emergente, con una orientación multidisciplinaria que promueve beneficios en todos los ámbitos –social, económico y ambiental–, con la finalidad de satisfacer las necesidades humanas y proteger el ambiente (Ávila, Gavilán y Cano, 2015). A esta nueva concepción de la CQ se le ha denominado química verde (QV). Esta QV se piensa operativamente como

el desarrollo de las metodologías que permiten modificar la naturaleza intrínseca de los productos o procesos, esto con la finalidad de reducir o eliminar las consecuencias adversas o los riesgos que pueden impactar tanto en el medio ambiente como en la salud humana (González, Pérez-Méndez y Figueroa-Duarte, 2016 p. 25).

De esta manera, en el contexto de este derrotero, abordaremos algunos eventos generados por la industria química, cómo surge la QV, cuáles son los principios que la rigen y sus desafíos, para finalmente llevar a cabo algunas consideraciones finales al respecto.

DESASTRES QUÍMICOS

Posterior a la segunda conflagración bélica de orden mundial, el proceso de industrialización en el mundo emergió con gran vertiginosidad, sin cuestionar si este progreso conllevaría efectos deletéreos sobre el ambiente, además de generar escenarios de alta peligrosidad que vulneraran la seguridad y salud de todas las personas (Doble y Kumar, 2007). De hecho, durante las décadas de los cincuenta y sesenta, los profesionales de la química habían considerado que la CQ permitiría resolver muchas de las necesidades que en el mundo subsistían, esto permitió crear muchos artilugios que en la actualidad usamos cotidianamente (Matlack, 2001).

Sin embargo, también perduran en la historia reciente incidentes con productos químicos que tuvieron efectos de variada magnitud, como incendios, explosiones, fugas o derrames de tipo químico. En éstos prevalecieron fallas operativas en su transporte, mantenimiento de las instalaciones industriales o derivado llanamente de errores humanos (Arcos *et al.*, 2007). Entre estos encontramos los siguientes ejemplos:

a. De 1920 a 1969

Lugar y año: Oppau (Alemania), 1921.

Incidente: explosión de 4,500 toneladas de sulfato de amonio y nitrato de amonio.

Consecuencias: área de afectación de un diámetro 105 metros y un socavón de 14 metros de profundidad; 561 víctimas mortales.

Lugar y año: Texas City, Texas (Estados Unidos), 1947.

* Universidad Autónoma de Nuevo León.
Contacto: cantup@hotmail.com



Incidente: explosión de 50 contenedores con nitrato de amonio.

Consecuencias: 561 víctimas mortales; 3,000 personas afectadas.

Lugar y año: New York City (Estados Unidos), 1949.

Incidente: fuga y explosión de disulfuro de carbono en un paso a desnivel.

Consecuencias: 23 autos destruidos; destrucción en un radio de 150 metros a la redonda.

Lugar y año: Habana (Cuba), 1960.

Incidente: Explosión de un barco con dinamita.

Consecuencias: 100 víctimas mortales.

b. Década de 1970-1979

Lugar y año: Flixborough (Inglaterra), 1974.

Incidente: explosión debido a la fuga de 36 toneladas de ciclohexano.

Consecuencias: 28 muertos y cientos de heridos. Destrucción completa de las instalaciones.

Lugar y año: Beek (Países Bajos), 1975.

Incidente: explosión de una nube de vapor con 5.5 toneladas de propileno.

Consecuencias: 14 víctimas mortales.

Lugar y año: Seveso (Italia), 1976.

Incidente: reacción química fuera de control que provoca el venteo de un reactor. Liberación de dioxina a la atmósfera.

Consecuencias: más de 1,000 evacuados; abortos espontáneos; contaminación de suelo.

Lugar y año: Novosibirsk (Federación de Rusia), 1979.

Incidente: explosión de fábrica de productos químicos.

Consecuencias: 300 víctimas mortales.

c. Década de 1980-1989

Lugar y año: Cubatao, Sao Paulo (Brasil), 1984.

Incidente: derrame de 700 toneladas de gasolina de un ducto de 24 pulgadas.

Consecuencias: 508 víctimas mortales.

Lugar y año: Tacoa (Venezuela), 1982.

Incidente: explosión de depósito de combustible.

Consecuencias: 153 víctimas mortales; 20,000 personas heridas; 40,000 personas evacuadas.

Lugar y año: San Juan Ixhuatepec (México), 1984.

Incidente: numerosas explosiones (15 BLEVE's) de esferas y tanques de Gas L.P.

Consecuencias: más de 500 muertos, más de 4,500 heridos; más de 1,000 desaparecidos; destrucción masiva de viviendas.

Lugar y año: Bhopal (India), 1984.

Incidente: escape de isocianato de metilo en una planta de fabricación de insecticidas.

Consecuencias: 3,500 muertos; 3,500 afectados; 150,000 personas requirieron tratamiento médico; efectos a largo plazo.

Lugar y año: Basel (Suiza), 1986.

Incidente: incendio de una planta química y contaminación del Río Rin con insecticidas y dioxinas.

Consecuencias: contaminación del Río Rin; miles de peces muertos; afectación a los ecosistemas.

d. Década de 1990-1999

Lugar y año: Guadalajara (México), 1992.

Incidente: serie de explosiones en la red de alcantarillado de la ciudad de Guadalajara por vertidos incontrolados de combustible procedente de la planta de Petróleos Mexicanos (Pemex).

Consecuencias: 190 muertos, 470 heridos, 6,500 damnificados, 1,547 edificios dañados, 600 vehículos dañados; 13 kilómetros de calles destruidas.

Lugar y año: Baku (Azerbaijan), 1994.

Incidente: incendio de un tren con sustancias químicas en un túnel.

Consecuencias: 300 muertos; 200 personas afectadas.

Lugar y año: Hyderabad (India), 1997.

Incidente: incendio y explosión en una refinería.

Consecuencias: 28 víctimas mortales; 100 personas afectadas.

Lugar y año: Lagos (Nigeria), 1998.

Incidente: ruptura y explosión de un gasoducto.

Consecuencias: 500 víctimas mortales.

e. Década de 2000 a 2010

Lugar y año: Toulouse (Francia), 2001.

Incidente: explosión de una fábrica con nitrato de amonio.

Consecuencias: 30 víctimas mortales; más de 2,500 personas heridas.

Lugar y año: Gaoqiao, (China), 2003.

Incidente: fuga de pozo de gas.

Consecuencias: 240 víctimas mortales; 9,000 personas recibieron atención en salud; evacuación de 64,000 personas.

Lugar y año: Graniteville (Estados Unidos), 2005.

Incidente: fuga de cloro de un tren cisterna.

Consecuencias: 9 víctimas mortales; 250 personas heridas; 5,400 personas evacuadas.

Lugar y año: Abidján (Costa de Marfil), 2006.

Incidente: residuos tóxicos de sulfuro de hidrogeno, mercaptanos e hidróxido sódico.

Consecuencias: diez víctimas mortales; más de 100,000 personas atendidas médicamente.

Como se ha podido apreciar en esta breve efeméride, las eventualidades promovidas por los accidentes químicos en el mundo se constituyen en una problemática social persistente que ha afectado la salud de las personas, los bienes materiales de la población, además de causar estragos en los sistemas naturales.

¿CÓMO SURGE LA QUÍMICA VERDE?

La QV emerge con el propósito de crear procesos y productos químicos para disminuir o no generar sustancias peligrosas. Las primicias de la QV se atribuyen al trabajo de Raquel Carson, mediante su libro *Primavera*

silenciosa (1962), donde hacía el señalamiento de las implicaciones perjudiciales del uso de biocidas en los campos agrícolas, por la floreciente y robusta industria química. En esta obra se documentan los efectos de los pesticidas sobre el medio ambiente natural y las muy serias implicaciones sobre la salud humana. Con ello generó manifestaciones sociales en favor de proteger al ambiente y la salud humana del DDT y en general de todo tipo de sustancia química que produjese alteraciones al entorno y pusiese en riesgo a la sociedad.

No obstante este antecedente, se le atribuye la génesis de la QV a los esfuerzos de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, que a partir de la década de los noventa impulsó una nueva postura conceptual frente a la contaminación generada esencialmente por el giro industrial químico (Mestres, 2013). Este envión fue producto de “la aprobación de la Ley de Prevención de la Contaminación (Pollution Prevention Act), la primera ley ambiental enfocada en la prevención de la contaminación desde la fuente de generación, en lugar de sólo enfocarse al control de los contaminantes” (Ávila, Gavilán y Cano, 2015, p. 2).



Posteriormente fue que la EPA, de acuerdo con González, Pérez-Méndez y Figueroa-Duarte (2016, p. 27),

adoptó oficialmente el nombre Programa de QV de EE.UU. Éste, desde su creación, ha servido como coordinador de las actividades más importantes dentro de los EE.UU., como El Premio Presidencial al Desafío en QV y la Conferencia anual de QV e Ingeniería.

Este acogimiento del concepto de QV sobrevino por el empuje de Anastas y Warner (1998) en su obra *Green Chemistry, theory and practice*, que condujo a los 12 principios que se deben de adoptar para lograr el propósito de la QV. A continuación mencionamos estos preceptos (González, Pérez-Méndez y Figueroa-Duarte, 2016, p. 27):

1. Es mejor prevenir la formación de residuos que limpiarlos una vez formados.
2. Los métodos sintéticos deben diseñarse para maximizar la incorporación en el producto final de todos los reactivos utilizados.
3. Siempre que sea posible, deben diseñarse metodologías sintéticas que usen y generen sustancias que no sean tóxicas para la salud y el medio ambiente.
4. Los productos químicos deben diseñarse para mantener la eficacia de su función, pero reduciendo la toxicidad.
5. El uso de sustancias auxiliares (por ejemplo, disolventes, agentes de separación, entre otros) debería ser innecesario en la medida de lo posible e inócuo cuando sean necesarios.
6. Los requerimientos energéticos deben considerarse y ser minimizados debido a su impacto medioambiental y económico. Los métodos sintéticos deben realizarse a temperatura ambiente cuando sea posible.
7. Las materias primas deben ser renovables cuando técnica y económicamente sea posible.
8. Debe evitarse el uso y generación de derivados (grupos bloqueantes, protección/desprotección, modificación temporal de las condiciones físicas/químicas) cuando sea posible.
9. Los reactivos catalíticos (tan selectivos como sea posible) son mejores que los reactivos estequiométricos.
10. Los productos químicos deben diseñarse de manera que su función no persista en el medio ambiente y puedan degradarse a productos inócuos.
11. Necesidad de desarrollo de metodologías analíticas que permitan analizar, monitorear y controlar previamente a la formación de sustancias peligrosas.
12. Deben escogerse las sustancias y la forma de una sustancia utilizada en un proceso químico de manera que se minimice el potencial de accidentes químicos, incluyendo escapes, explosiones e incendios.

Como se observa, los 12 principios están encaminados a los procesos químicos de elaboración de productos, que conllevan “tres apartados fundamentales y distintivos: *a)* prevención de la causa de riesgo; *b)* metodologías químicas, y *c)* acción de acuerdo con un diseño” (Mestres, 2013, p. 103). Dichos preceptos han de permitir conciliar el desarrollo y empleo de la CQ en la compatibilización con el ambiente, con la finalidad de que la industria, particularmente la química, tome acciones a corto, mediano y largo plazo, que le permitan transitar por la QV y le aproximen a la tan anhelada química sostenible (QS). Por lo tanto, la QV conlleva un cambio totalmente de paradigma, que debe tener por línea conductora la sostenibilidad.

DESAFÍOS DE LA QUÍMICA VERDE

La QV otorga los fundamentos para fortalecer y fundar el concepto de QS, cuyo precepto central es la disminución de la contaminación por compuestos nocivos que dañen la salud y el ambiente. Sin embargo, Mestres (2013, p. 104) menciona que a “la química del siglo XXI se le presenta un reto de ámbito mucho más amplio: cortar en su mismo origen cualquier tipo de contaminación y riesgo debido a las sustancias y conversiones químicas”.

Para entrever éste y otros desafíos que afrontará la QV, es muy importante avistar cuáles son sus alcances en distintas dimensiones. De acuerdo con Cortés, Reyes y Bustos (2016, p. 340), a nivel global se pueden reconocer cinco ámbitos en los que la QV está incidiendo y deberá continuar haciéndolo en los próximos años:

1. **Ámbito industrial:** evita la formación de sustancias luego del empleo de compuestos químicos en los diferentes procesos industriales.
2. **Ámbito medioambiental:** promueve la idea de la química limpia al servicio de la humanidad y en armonía con los recursos naturales.
3. **Ámbito social:** fomenta la capacidad para razonar y crear soluciones a las problemáticas actuales, a la vez de prevenir futuros.
4. **Ámbito filosófico:** presenta la idea de elaborar productos limpios, lo que implica la reflexión de las consecuencias de los productos antes de su elaboración.
5. **Ámbito escolar:** incorpora los principios de la QV dentro de la química escolar como una estrategia que permee las diferentes prácticas de laboratorio en los protocolos verdes.

Esta coyuntura para instituir una CQ en el mediano y largo plazo que se aproxime a los ámbitos antes descritos, permitirá un ejercicio de la CQ con procesos idóneos al ambiente y que éstos sean beneficiosos económicamente como corresponde a la comprensión de la QV (Reyes-Sánchez, 2012). Mientras, de acuerdo a Doménech (citado por Osorio y Di Salvo, 2008, p. 13), los desafíos de la QV se centran en cuatro hechos relevantes:

Recursos: el uso de los recursos materiales y energéticos obtenidos de fuentes renovables para la obtención de los productos químicos básicos.

Residuos: maximización de la eficiencia molecular durante las transformaciones, evitando, en lo posible, la obtención de subproductos y residuos, que incrementen el precio ambiental y económico del proceso.

Reactivos: disminución del uso de éstos mediante la utilización

de catalizadores duraderos. Diseño de compuestos químicos inocuos mediante la manipulación de la estructura molecular y el conocimiento de la actividad toxicológica.

Reacciones: reducción del uso de disolventes utilizados y reducción de la accidentalidad durante el proceso a través de una precisa selección de tipologías de reacción y estados físicos con un menor grado de riesgo.

Mientras tanto, en la renovada práctica, Contreras y Contreras (2017, p. 354) indican que la QV proyecta el “desarrollo de sustancias químicas seguras que cumplan su función sin causar riesgos a la salud o al ambiente, y en cuya manufactura se disminuyan las emisiones utilizando energías alternativas como la energía solar, la eólica o la biomasa”. Mientras Anastas, Kirchoff y Williamson (2001) señalan que esto debe ser mediante la catálisis, la cual se está constituyendo en una de las columnas más sólidas de la QV; y agregan que el diseño y aplicación de estos procesos están logrando, al mismo tiempo, los objetivos duales de protección del medio ambiente y beneficio socioeconómico. Finalmente, Anastas y Zimmerman (2016) revelan que subsisten campos en los cuales la QV podrá realizar contribuciones altamente importantes en el futuro para alcanzar el desarrollo sostenible, éstos refieren a temas de ciencia y tecnología relacionados con la alimentación y nutrición, la salud de las personas, la pobreza y en lo que concierne a la depuración del recurso hídrico.

CONSIDERACIONES FINALES

Sin lugar a dudas, la QV se constituye en una nueva postura desde su surgimiento con “estándares altos para llevar a cabo la investigación y producción de sustancias y procesos químicos, maximizando sus beneficios y minimizando los efectos secundarios que pueden ser dañinos al ser humano y al medio ambiente” (Doria, 2009, p. 419). Por lo tanto, desde la orientación de la sustentabilidad, como señala Reyes-Sánchez (2012, p. 227), es pertinente “optar por una química cuyos productos y procesos busquen alcanzar el equilibrio ambientalmente viable, socialmente viable, económicamente redituable y éticamente aceptable, a efecto de asegurar la existencia de la vida en el planeta”. En estos términos se erige la QV como una ciencia clave en el rubro de la investigación y desarrollo tecnológicos, al proveer en los últimos años soluciones a temas relacionados con la minimización de residuos contaminantes al ambiente.

Actualmente, se ha confirmado que la QV “puede utilizar materiales compatibles con el entorno, desarrollando procesos innovadores que reduzcan o eliminen

la generación de sustancias peligrosas y residuos tóxicos persistentes provenientes de diversas actividades industriales” (Pájaro y Olivero, 2011, p. 172); para esto ha creado procesos y estudios de carácter molecular para transformar las propiedades físicas y químicas de los compuestos tipificados como altamente peligrosos.

Sin embargo, el reto más desafiante que tendrá la QV será constituirse en una ciencia que conlleve la motivación necesaria para crear una conciencia ambiental en la comunidad científica para seguir produciendo nuevos materiales y sustancias eficientes e inocuas. Por otra parte, una contribución muy importante para que la QV trascienda, es que la sociedad incorpore esta nueva corriente en los currículos académicos universitarios encargados de la formación de recursos humanos profesionales. Esta última aseveración, la basamos en el argumento que hace Leff (1999, p. 15) al indicar que la “complejidad ambiental implica una revolución del pensamiento, un cambio de mentalidad, una transformación del conocimiento y las prácticas educativas, para construir un nuevo saber y una nueva racionalidad que orienten la construcción de un mundo de sustentabilidad”.

REFERENCIAS

- Anastas, P.T., Kirchhoff, M.M., y Williamson, T.C. (2001). Catalysis as a foundational pillar of green chemistry. *Applied Catalysis A: General*. 221 (1-2): 3-13.
- Anastas, P.T., y Warner, J.C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford: Oxford University Press.
- Anastas, P.T. y Zimmerman, J. (2016). The Molecular Basis of Sustainability. *Chem*. 1: 10-12.
- Arcos, M.E., Izeapa, C., Bernabé, L., et al. (2007). *Riesgos químicos*. México: Cenapred.
- Ávila, J.G., Gavilán, I.C., y Cano, G.S. (2015). *Teoría y experimentos de química orgánica con un enfoque de química verde*. México: UNAM.
- Belloso, W.H. (2009). Historia de los antibióticos. *Rev. del Hosp. It. de Buenos Aires*. 29(2): 102-111.
- Carson, R. (1962). *Primavera silenciosa*. Barcelona: Grijalbo.
- Contreras, R.R., y Contreras, D.J. (2017). Objetivos del desarrollo sostenible, química verde y agricultura sostenible. En: L.A., Sandía, F.I., Rivas, E.R. Recalde, et al. (Eds.). *Avances, Desarrollo Y Sustentabilidad Agroambiental en Ecuador y Venezuela*. Venezuela: Universidad de Los Andes y Pontificia Universidad Católica del Ecuador, pp. 348-359.
- Cortés, A.J., Reyes, J.D., y Bustos, E.H. (2016). Aproximación a la química verde escolar a través de los protocolos verdes. *Revista Tecné, Episteme y Didaxis*. Número extraordinario: 338-350.
- Doble, M., y Kumar, A. (2007). *Green chemistry and engineering*. New York: Academic Press.
- Doria, M.C. (2009). Química verde: un nuevo enfoque para el cuidado del medio ambiente. *Ed. Quím.* Octubre: 412-420.
- González P.J., Pérez-Méndez, C., y Figueroa-Duarte, S. (2016). La enseñanza de la química desde la perspectiva de la química verde. *Revista Científica*. 24: 24-40.
- Kirchhoff, M. (2005). Promoting sustainability through green chemistry. *Resour. Conserv. Recy.* 44: 237-243.
- Leff, E. (1999). *La complejidad ambiental*. México: Siglo XXI.
- Matlack, A.S. (2001). *Introduction to Green chemistry*. USA: CRC Press.
- Mestres, R. (2013). Química sostenible: naturaleza, fines y ámbito. *Educación Química*. 24(1): 103-112.
- Moeller, D.W. (2005). *Environmental health*. Cambridge: Harvard University Press.
- Osorio, R., y Di Salvo, A. (2008). Química verde: un nuevo enfoque para las actividades experimentales de química. *Multiciencias*. 8: 11-17.
- Pájaro, N.P., y Olivero, J.T. (2011). Química verde: un nuevo reto. *Ciencia e Ingeniería*. 21(2): 169-182.
- Peiró, A.M. (2003). *Nuevas aportaciones al desarrollo de metodologías en química verde*. (Tesis doctoral). Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona.
- Reyes-Sánchez, L.B. (2012). Aporte de la química verde a la construcción de una ciencia socialmente responsable. *Educación Química*. 23(2): 222-229.
- Sierra, A. Meléndez, A., Ramírez-Monroy, A. et al. (2014). La química verde y el desarrollo sustentable. *Rev. Iber. para la Inv. y el Des.* Ed. 5(9): 1-15.