
Del reto de la humanidad y el papel de la química ante el cambio climático

Edilma Sanabria Español

 <https://orcid.org/0000-0003-2661-8696>

UNIVERSIDAD MANUELA BELTRÁN

DOI: <https://doi.org/10.29097/9789585303072.04>

Resumen

En este capítulo se describen los adelantos que se han hecho con respecto a la química verde, así como la problemática que hay para aplicarla, ya que muchas áreas del conocimiento buscan la forma de explotar la química en términos económicos, pero desconocen sus preceptos. Incluso, algunos interesados en la sostenibilidad no la reconocen como una de las principales herramientas de transformación ambiental. De esta forma, se abordan los inicios de la química verde, las definiciones que hay al respecto, su puesta en marcha y los logros que pretende alcanzar. Posteriormente, se da cuenta de los adelantos que se han hecho a escala mundial a favor de la sostenibilidad, y por último se describe una propuesta para hacer química verde en las organizaciones, en la educación y en el campo, a manera de ejemplos.

Palabras clave: medio ambiente; química verde; química sostenible; sostenibilidad.

La química y su papel en la problemática ambiental contemporánea

El hombre ha evolucionado a través del tiempo y en su afán por adaptarse al medio en el que se desenvuelve ha desatado grandes transformaciones en el ambiente que están provocando un grave cambio climático. Los estu-

dios y proposiciones de Tyndall, Fourier, Arrhenius y Callendar acerca del aumento de la concentración de anhídrido carbónico y la temperatura media global pasaron de ser simples especulaciones a hechos que están ocurriendo (Anderson, Hawkins y Jones, 2016). En el trasegar del hombre, la química ha sido su aliada y más aún desde que grandes inventores como el francés Etinne Lenoir en 1860 y el alemán Siegfred Marcus en 1865 construyeron los primeros motores impulsados por combustibles fósiles como el petróleo. Sin embargo, el uso desmedido y sin control de estas sustancias amenaza con pasar factura por la comodidad que hemos aprovechado durante todo este tiempo, ya que está provocando cambios a escala global que impactan de forma negativa la salud humana y el medio ambiente.

Un ejemplo de esto es la polución química que amenaza los ecosistemas, la vida salvaje, la salud humana y el crecimiento económico, entre otros factores. Esto sucede porque relativamente pocas de los miles de sustancias químicas que actualmente están en el mercado no han sido evaluadas para determinar su potencial impacto y sus formas de mitigación. Sin contar con la gran cantidad de sustancias nuevas que día a día son diseñadas, sintetizadas y puestas en el mercado sin estudios previos de ciclo de vida del producto, planificación de una producción limpia, distribución, uso, reciclaje o disposición final (Halpaap y Dittkrist, 2018).

Pero la química no ha sido solo la artífice de estos malos momentos en el plano ambiental; en sus teorías está la solución al devastador panorama que estamos percibiendo. La química es la ciencia que mayoritariamente puede contribuir a mejorar este inconveniente, dictando parámetros de sostenibilidad, desarrollando nuevas tecnologías para evitar producir, capturar o reducir los gases que provocan el efecto invernadero y creando procesos más limpios y eficientes con menores costos ambientales. Un ejemplo para aclarar este punto es el de la polución, pues tal problema se puede tratar desde los avances obtenidos en la misma química (Tse-Lun *et ál.*, 2020), investigándolo a escala molecular y alrededor del ciclo de vida de los productos y proponiendo procedimientos amigables con el medio ambiente. También se puede hacer mediante procesos que lleven a productos similares, pero con bajo impacto ambiental o por medio de formas de inactivación para los

productos indeseados que dañan el medio. Todo esto se realiza poniendo en práctica el legado que el padre de la química moderna, Antoine Lavoisier, nos enseñó: “La materia no se crea ni se destruye, solo se transforma”. Si somos capaces de transformar la materia para beneficio económico, también podemos serlo para transformarla en beneficio ambiental.

De esta manera, en los brazos de esta ciencia pura reposa la solución a esta problemática. Por esta razón, en los últimos 30 años se viene gestando una nueva forma de hacer química, que se conoce como *química verde*. La química verde también es denominada, por algunos, como química sostenible, y busca la sostenibilidad teniendo en cuenta el ciclo de vida de las sustancias químicas y sus residuos, al avanzar en la investigación e innovación y ampliando el desarrollo de alternativas seguras, entre otros aspectos (Halpaap y Dittkrist, 2018). Es decir, se refiere al diseño de productos químicos, agroquímicos, renovables y procesos que reducen o eliminan el uso o la generación de sustancias peligrosas (American Chemistry Society, 2020; United States Environmental Protection, 2020). Es un concepto científico que busca satisfacer las necesidades presentes sin sacrificar los recursos y el ambiente para las próximas generaciones (Tai *et al.*, 2020). Un ejemplo ampliamente difundido que podría ayudar a visualizar cómo la química verde puede llegar a contribuir en la reducción de sustancias peligrosas es el de la generación de energía a partir de celdas fotovoltaicas (Vega, 2018), como alternativa a la quema de los combustibles fósiles que contaminan el medio ambiente. En el capítulo 6 de este libro también se puede encontrar un ejemplo de reutilización de aceites usados producidos por la industria y el sector de transporte, que contribuye a la sostenibilidad de los procesos.

La tarea de implementar esta nueva forma de hacer ciencia no es fácil, ya que desde sus inicios la química verde ha contado con un impedimento: a pesar de que la química constituye el pilar de muchas áreas del conocimiento como la ingeniería de alimentos, la ingeniería ambiental, la minería, la bioquímica, la medicina y la ingeniería de materiales, entre otras, muchos profesionales o industrias en estas áreas, e incluso de química pura, la usan de forma automática o empírica, desconociendo los principios de la química verde (Loste *et al.*, 2020). Solo sacan provecho de sus desarrollos sin tener en

cuenta que requiere un equilibrio para hacer de ella algo sostenible. Piensan que el planeta es como una gran solución *buffer* que aguanta las pequeñas porciones de contaminación que estamos introduciendo. No obstante, no se dan cuenta de que la cantidad de sustancias contaminantes es enorme, y por eso ya estamos observando las consecuencias devastadoras de ese gran desequilibrio ambiental. Debemos ser conscientes de las grandes ventajas que trae consigo esta ciencia aplicada, pero también de las responsabilidades que implica y de cómo ella misma, si la sabemos aplicar, permite dar respuesta a esta problemática. Por ejemplo, en este último caso, por intermedio de la química, la ingeniería de materiales desarrolla nuevos polímeros aislantes capaces de reducir hasta el 80% el consumo energético en un hogar con necesidades promedio, o desarrolla polímeros capaces de sustituir la madera para evitar cortar árboles (Smith y Hashemi, 2006).

La química verde y sus aportes en la sostenibilidad ambiental de las organizaciones

Un estudio que muestra la problemática sobre el desconocimiento de la química verde por parte de personas fuera de su campo fue realizado por un equipo interdisciplinario en la Universidad de San Jorge, España, a un grupo de 921 estudiantes que tomaron el curso de “Sostenibilidad ambiental de las organizaciones en la economía circular” y fue publicado en 2020 (Loste *et al.*, 2020). Los participantes eran de 26 países diferentes. De ellos, el 60% indicó que tenían ocupaciones relacionadas con la sostenibilidad y el 40% afirmó que su ocupación no tenía nada que ver con la sostenibilidad. Los resultados fueron obtenidos por la aplicación de dos encuestas y mostraron que los estudiantes no reconocían la química verde como una herramienta exitosa para la sostenibilidad. El 92% señaló que no la podría en práctica, pues considera que era un asunto particular de la química y no algo de interés general. Lo anterior es sorprendente, ya que se trataba de estudiantes que estaban interesados en la sostenibilidad y muchos de ellos trabajaban en temas relacionados con ella.

Otro punto que llamó la atención de los investigadores es que, de las seis herramientas propuestas para mejorar la sostenibilidad, que consistían

en 1) evaluación el ciclo de vida de la sustancia, 2) eficiencia energética, 3) economía circular, 4) sistema de manejo ambiental, 5) ecodiseño y 6) química verde, esta última fue la que recibió menor porcentaje con respecto al grado de importancia para mejorar la sostenibilidad, siendo los valores del 54,8; 51,9; 49; 47,3; 46,3 y 36,6%, respectivamente. Los investigadores sugieren que esto puede ser debido a que muchas personas tienen barreras emocionales provocadas por su temor a la química o “químicofofia”, entendida esta como una aversión irracional contra las sustancias químicas o la química en general. Lo paradójico es que, aunque muchas personas tienen esta fobia, no es posible avanzar sin esta herramienta que es esencial para crear prácticas sostenibles. No podemos solo suplirnos de la química para llevar a cabo nuestros negocios de forma automática sin olvidar que esta trae consigo una responsabilidad para la salud de humanos, animales y medio ambiente.

Lo anterior muestra la necesidad urgente de aumentar el conocimiento acerca de la química verde a nivel general, el cual no se puede limitar solo para quienes practiquen directamente la profesión. Debemos poner en práctica un trabajo multidisciplinario que incluya cualquier área que use directa o indirectamente la química en su quehacer diario, y aquellas áreas del conocimiento que puedan contribuir a su divulgación, concientización, investigación, formación y legislación, entre otras medidas. Solo desde ese punto de partida y con una visión amplia y abierta podemos alcanzar el nivel requerido para avanzar en la tan anhelada sostenibilidad que en estos momentos no es una opción, sino que se ha convertido en una necesidad para la salud y el medio ambiente (Halpaap y Dittkrist, 2018).

Surgimiento de la química verde y definiciones

El concepto de química verde fue desarrollado por Anastas y Warner en 1998, quienes la destacaron como un proceso que busca prevenir la contaminación y minimizar el uso de materiales peligrosos. Más que un concepto, se ha convertido en una nueva filosofía aplicada a la forma de hacer química, que en un comienzo se basó en doce principios o reglas principalmente relacionadas con la síntesis química. Estas reglas han tenido un gran impacto

en la comunidad química y el concepto se ha abierto paso como un nuevo campo entre las diferentes disciplinas de la química (Lenoir et ál., 2020). A continuación, se describen de forma general los *principios de la química verde* que fueron dados a conocer a la comunidad científica por Anastas y Warner (1998):

1. Es mejor evitar producir residuos en lugar de limpiarlos o tratarlos una vez formados.
2. Las síntesis deben ser diseñadas para maximizar la incorporación de todos los materiales usados en el proceso hasta llegar al producto final.
3. Cuando sea posible, las metodologías sintéticas deben ser diseñadas para usar y producir compuestos que no sean tóxicos para los humanos o tengan baja toxicidad, y que no afecten negativamente el medio ambiente.
4. Los métodos químicos deben ser diseñados para que sean eficaces y al tiempo reducir su toxicidad.
5. Siempre que sea necesario usar agentes de separación, solventes u otras sustancias auxiliares, usar compuestos que sean inocuos o si no es necesario no usarlos.
6. Hacer un reconocimiento de los requerimientos energéticos en los métodos sintéticos y minimizarlos, por ejemplo, llevando a cabo las reacciones a temperatura ambiente y presión atmosférica para minimizar su impacto ambiental y económico.
7. Donde sea técnica y económicamente viable, usar materias primas renovables.
8. Cuando sea posible, evitar introducir en las síntesis grupos de protección, desprotección, de bloqueo o modificaciones temporales de procesos físico-químicos, entre otros.
9. Usar catalizadores tanto como sea posible (si son selectivos, mejor).
10. Los productos químicos deben ser diseñados para que al final de su uso no persistan en el ambiente y que se degraden en productos inocuos.

11. Los métodos analíticos deben permitir su seguimiento y control en tiempos reales antes de la formación de sustancias peligrosas.
12. Las sustancias y la forma en que se usan deben elegirse de tal manera que se minimice el potencial de accidentes químicos, incluidos los escapes, las explosiones y los incendios.

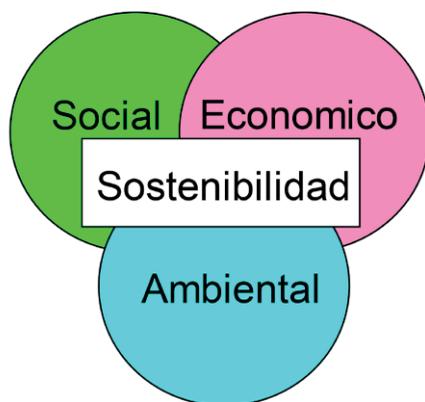
Los anteriores principios se pueden reagrupar en tres categorías que son 1) polución y prevención de accidentes, 2) seguridad y sostenibilidad de los recursos y 3) energía y sostenibilidad de los recursos. También pueden ser desplegados en diferentes escenarios, como en la gestión industrial, en la práctica educativa y en el desarrollo tecnológico. Además, pueden regularse mediante políticas gubernamentales a escala global. Así, la química verde es definida como una forma de hacer química segura y amigable con el medio ambiente, que se preocupa por abordar factores económicos (mejorar los beneficios) y sociales relacionados con el al impacto de los productos químicos durante todo su ciclo de vida. Está relacionada con el agua, la energía, la comida, el clima y la población, aparte de afectar la salud humana y el bienestar de las especies (Tse-Lun y Pen-Chi, 2020).

Pero la anterior no es la única definición que se le ha dado a la química verde. La primera definición fue la de Anastas y Wraner (1998), cuando fue concebida como “el diseño de productos químicos y procesos que reducen o eliminan el uso y la generación de sustancias tóxicas”. Esta definición es la aceptada por la Sociedad Americana de Química y la Agencia de Estados Unidos para Protección del Medio Ambiente, entidades que además usan indistintamente los términos *química verde* y *química sostenible* (como es mejor conocida en Europa). Mientras que la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, la define como “un proceso científico que busca mejorar la eficiencia con que los recursos naturales son usados para satisfacer las necesidades humanas de productos y servicios químicos”. También existe un concepto holístico de la química sostenible —en este se diferencian la química verde de la química sostenible—; en dicha noción es considerado el ciclo de vida total del producto, así como la cultura, los actores y las instituciones que intervienen (Halpaap y Dittkrist, 2018).

Así, lo que se vislumbra a partir de las diferentes interpretaciones es que la química sostenible se convierte en un nuevo tipo de química, un nuevo marco de evaluación que incluye aspectos sociales, económicos y ambientales (figura 1), y en una visión o destino global para alcanzar a largo plazo (Halpaap y Dittkrist, 2018).

Figura 1

Química verde, una nueva forma de hacer química



Nota. La química sostenible es una nueva forma de hacer química que incluye aspectos sociales, económicos y ambientales.

Puesta en marcha de la química verde

Como se ha visto hasta ahora, se han dado los pasos iniciales en el camino hacia la química sostenible. Sin embargo, nos encontramos en el inicio de un camino intrincado con varias posibles rutas para seguir, dadas por las diferentes definiciones que hay de la química verde. Incluso se debe aclarar si se trata o no de la misma química sostenible. Por tanto, es urgente que los expertos de varias naciones y desde diferentes disciplinas se sienten a dialogar y formulen una definición completa, que no utilice términos abstractos o ambiguos y sirva de guía inequívoca para dar direccionamiento a todos los actores que participan directa o indirectamente de la química. Se precisa una definición que no dé lugar a muchas explicaciones ni tampoco induzca

a cometer errores de interpretación de los investigadores o de quienes la aplican, y permita trazar la ruta que se deba seguir para la agenda que hay programada hasta 2030 (Halpaap y Dittkrist, 2018).

Actualmente, hay varias iniciativas encaminadas en la dirección de cuidar y proteger al planeta, como el *sistema de gestión ambiental*, la *economía circular* y la *ecología industrial*, entre otras. Estas iniciativas bien se podrían usar en sinergia con la química verde para que ayuden a hacer eco en las diferentes organizaciones en pro de la sostenibilidad ambiental. No obstante, se ha visto que esta articulación tiene asociados algunos inconvenientes. El primero de ellos es, como se mostró en la primera sección, el desconocimiento o la inconsciencia de la aplicación de la química verde como estrategia ambiental, la falta de regulaciones específicas o de formas de medida de productos o procesos que no sean verdes y contaminen, la falta de una investigación transdisciplinar y la dificultad para aplicar los principios de la química sostenible más allá del campo químico (Loste *et ál.*, 2020).

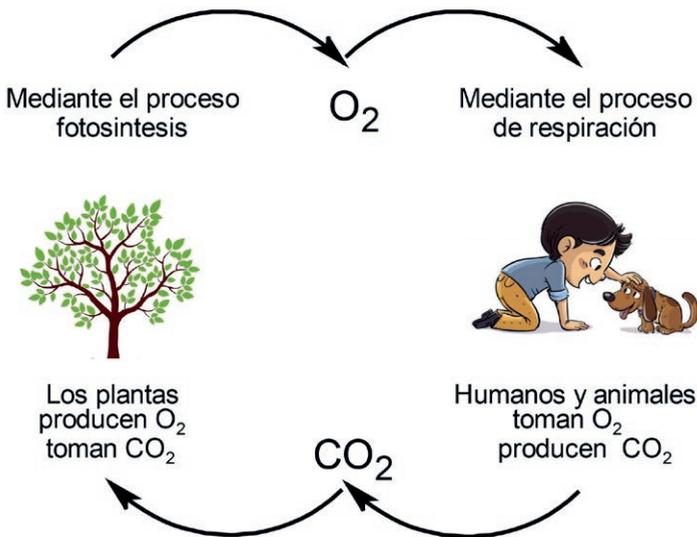
Existen algunos intentos en la academia por incluir dentro de sus currículos la química verde, usando materiales y métodos amigables con el medio ambiente. Aunque se ha encontrado falta de uniformidad entre instituciones educativas y resistencia, principalmente por diferencias con lo impartido en los libros de química, se está avanzando en esta dirección (Hjeresen *et ál.*, 2020; Hutchison, 2019; Elschami y Kümeerer, 2020). No obstante, en muchos campos se desconoce el papel de la química en el desarrollo de soluciones que ayuden a superar la crisis ambiental que ya estamos viviendo.

La química, como se indicó, es la ciencia central que permite dar solución a la insostenibilidad de los procesos que durante mucho tiempo han generado presión en el planeta, y se vale de la química verde para avanzar hacia una química sostenible, con investigación e innovación, emprendimiento, transferencia de tecnologías y capacidad de creación (Elschami y Kümeerer, 2020; Halpaap y Dittkrist, 2018). La química es la ciencia central que puede dictar los parámetros de sostenibilidad de cada proceso y producto. No obstante, son las ciencias aplicadas las que, en sinergia, a través de una investigación interdisciplinar, ponen en marcha nuevos esquemas y técnicas para desarrollar productos seguros y nuevos procesos de producción,

sin desconocer otras áreas del conocimiento, ya que la química sostenible requiere un balance cuidadoso entre lo económico, lo social y lo ambiental, todo en conjunto, expresado alrededor del ciclo de vida de un producto y sus residuos. Por eso en cualquier empresa donde se produzca o maneje un material, si hay un equipo de trabajo interdisciplinar para transformar este material en un producto o servicio que implique beneficios económicos, debe haber un equipo interdisciplinar que a su vez trabaje en cerrar el ciclo del proceso o producto para que este no genere ningún costo ambiental. Esto debe estar amparado por una regulación gubernamental y una vigilancia de cada producto.

Figura 2

Ejemplo de un proceso sostenible



Nota. Esquema de transformación de la materia en un proceso sostenible ambientalmente.

El problema actual es que se está transformando la materia en una sola dirección sin contar con el equilibrio que la misma naturaleza nos ha enseñado. Solo por poner un ejemplo de esto último, los animales y los humanos, en el proceso de respiración, toman oxígeno y entregan al ambiente dióxido

de carbono, pero la misma naturaleza, a través de los árboles, toma el dióxido de carbono y produce oxígeno, con lo que cierra el círculo ambiental (figura 2). De esta manera podemos usar esa lección y aplicar la ley de conservación de la materia para transformar las sustancias que producimos en función, no solo de lo económico, sino también de los ecosistemas, tomando los productos generados después de su uso, para volverlos inocuos y así cerrar su círculo. En este proceso la química verde sirve de marco de referencia analítico para acceder al ciclo de vida de los productos.

Adelantos a escala mundial a favor de la sostenibilidad

Se han realizado varias convenciones relacionadas con la prevención y el manejo de productos tóxicos y materiales peligrosos. Entre ellas tenemos: 1) Declaración de Dubai sobre la necesidad del manejo racional de productos químicos; 2) Convenio de Basilea para el control del movimiento transfronterizo de desechos peligrosos y su eliminación; 3) Convenio de Estocolmo para la moderación de contaminantes orgánicos persistentes; 4) Declaración de Río sobre medio ambiente y desarrollo para evitar la degradación de la calidad ambiental y el agotamiento de los recursos naturales; 5) Convenio de Rotterdam sobre las responsabilidades de la importación de productos químicos peligrosos, y 6) Sistema globalmente armonizado de clasificación y etiquetado de productos químicos, entre otros (Tse-Lun *et ál.*, 2020). Sin embargo, en seguida se destaca el trabajo realizado por la Organización de las Naciones Unidas, ya que ha tenido una visión global de la química verde.

El concepto de *química sostenible* fue reconocido en 2016 por la Asamblea Ambiental de las Naciones Unidas (United Nations Environmental Assembly [UNEA]). Allí se redactó una resolución (UNEA-2 Resolution 2/7) acerca del buen manejo de químicos y residuos, en la que se invitaba a los países, organizaciones internacionales y otros interesados, incluido el sector privado, que tenían experiencias relevantes, a someter a la Secretaría propuestas para realizar mejores prácticas de química sostenible. Además de esto, se las instó a indicar cómo la química verde mejora la gestión de los productos químicos y cómo a través de ella se podía implementar la agenda de desarrollo sostenible para 2030. Las propuestas presentadas podrían tener varios ejes temáticos, entre los cuales se encontraban: alternativas químicas

seguras, alternativas no químicas, investigación y desarrollo, transferencia de tecnologías, modelos de negocio con innovación (formas de financiación), esquema de investigación, reforma de los currículos e incentivos económicos, entre otros.

Al final se solicitó al director de la UNEA preparar un reporte en el que analizara la información recibida para ayudar a la Asamblea a considerar las oportunidades que presenta la química verde con respecto a políticas de producción y consumo sostenibles, y la posibilidad de que la química pueda contribuir al logro de la agenda de 2030. De este modo, en febrero de 2017 se realizó un encuentro en Brasil, en el que se analizaron de manera informal varias perspectivas y conceptos por parte de representantes del Gobierno, el sector privado, la sociedad civil y la comunidad investigativa. Las discusiones sostenidas giraron en torno a políticas de sostenibilidad química, iniciativas de sustitución en empresas o minoristas o la reformulación de su currículo químico, lanzamiento de un centro de colaboración para la química sostenible, actividades de sostenibilidad y química verde, entre otras (Halpaap y Dittkrist, 2018).

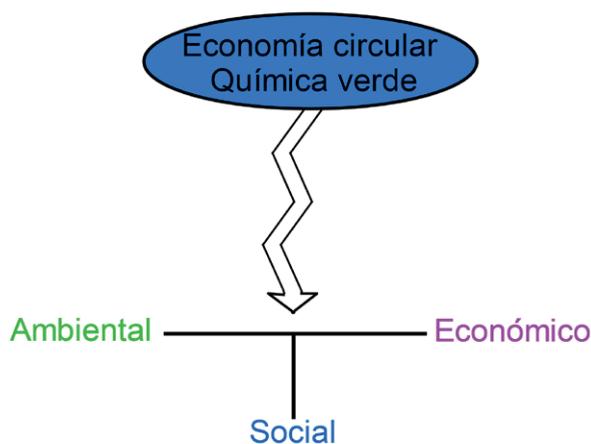
Posteriormente, el 14 de septiembre de 2017 en Berlín, Alemania, se realizó un taller organizado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UN Environmental) y el Centro de Colaboración Internacional para la Química Sostenible (International Sustainable Chemistry Collaborative Centre [ISC₃]). Allí, cerca de 30 innovadores, interesados y expertos alrededor del mundo expusieron el potencial de la química sostenible con varios casos. Por ejemplo, ellos demostraron que se puede reemplazar el uso del mercurio en la minería del oro por métodos biológicos; reemplazar el peligroso permanganato de potasio en el tratamiento de los jeans; diseñar procesos biomiméticos y electroquímicos de flujo continuo para sustituir los agentes tóxicos en la producción farmacéutica, y usar fotocatalisis para descomponer contaminantes en agua hasta moléculas no tóxicas empleando luz solar. En este taller, además, se vio la necesidad de pasar de las ideas al concepto y del concepto al mercado. Para esto, los participantes estuvieron de acuerdo en que es necesario concretar el acceso a laboratorios, la obtención de patentes y licencias, que haya un capital asegurado y acceso al mercado, entre otros recursos. Todo esto requiere políticas globales, acciones

que permitan poner a andar las ideas y explorar oportunidades. También es conveniente no solo la participación del Gobierno, sino también de la comunidad internacional, que tiene los entes para proveer el soporte necesario para permitir la prosperidad de las empresas emergentes que apoyan la química verde (Halpaap y Dittkrist, 2018).

En la actualidad se habla mucho de *economía circular*, y aunque no hay un consenso en su definición (Grafström y Aasma, 2021), se sabe que está íntimamente ligada a la química verde, ya que también propone un balance entre el crecimiento económico, la parte social y la protección del medio ambiente. En esta dirección, la química verde y la economía circular buscan juntas romper el conflicto en estos tres aspectos (figura 3). Por ejemplo, no se puede pensar solo en mejorar la calidad de vida de las personas y apuntar al crecimiento económico produciendo polímeros plásticos, drogas farmacéuticas y obleas de silicio, sin saber que esto aumenta la dispersión de sustancias tóxicas, la contaminación y, por tanto, un deterioro del medio ambiente. Por el contrario, se busca que los productos generados pasen de un orden lineal a uno circular, para que sean sostenibles químicamente (Smieja y Babcock, 2017).

Figura 3

Integración de la química verde en los ámbitos social, económico y ambiental



Nota. Al igual que la economía circular, la química verde busca romper el conflicto entre el crecimiento económico, la parte social y el medio ambiente.

A la luz de lo expuesto, en diferentes países se han implementado políticas gubernamentales, industriales y educativas que buscan aplicar los principios de la química verde. Entre estos se encuentran Canadá, China, Alemania, Japón, Corea del Sur, Suecia, Taiwán, Estados Unidos y Reino Unido. Para integrar la química verde a la economía circular, Tse-Lun *et al.* (2020) proponen cinco estrategias que permiten dirigir de forma prioritaria las políticas de gobernanza. Estas son: 1) acuerdos de colaboración entre departamentos de cada país, cuyo objetivo sea la protección del medio ambiente; 2) establecimiento de producción limpia y productos verdes a partir de diseños innovadores y escalables realizados por ingenieros; 3) provisión de un sistema integrado de gestión de productos químicos; 4) implementación de programas de educación en química verde, y 5) cambio en los modelos de negocio tradicionales relacionados con productos químicos.

Logros que se pretenden alcanzar con la química verde

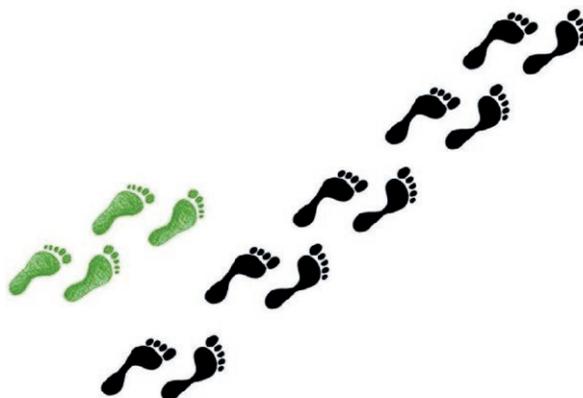
Dentro de los logros que busca alcanzar la química verde de forma general están: primero, disminuir el consumo de energía y agua (Sheldon, 2018); segundo, minimizar el uso de materiales peligrosos (Kirchhoff, 2005), y tercero, apuntar al encuentro de una línea triple de beneficio entre la parte social, la económica y la ambiental (Beach *et al.*, 2009). En este último caso, para lo social se busca poder elaborar y usar productos verdes que mejoren la calidad de vida de las personas, preservar la salud humana a través de la seguridad de los trabajadores en las industrias químicas, emplear productos químicos seguros para los consumidores, tener menos exposición a sustancias tóxicas y menos liberación de sustancias químicas al aire o al agua y crear más productos inocuos al medio ambiente. Con respecto a la parte económica, se pretende la reducción del consumo de productos derivados del petróleo, la disminución de las impurezas en plantas de manufactura, el aumento del valor del producto y la mejoría en la competitividad de las industrias químicas. Finalmente, en relación con la parte ambiental, se busca la creación de productos menos perjudiciales para animales y plantas, que tengan bajo impacto en el calentamiento global o que afecten menos la capa de ozono, y que no produzcan contaminación; además se pretende una

menor alteración química de los ecosistemas, menor uso de vertederos, altos rendimientos en reacciones químicas, menos etapas de síntesis, disminución de residuos, más bajos costos de tratamiento y mejor desempeño de los productos finales (Tse-Lun *et al.*, 2020).

Aunque se han dado pasos lentos en la química verde con respecto al deterioro ambiental que se está viendo (figura 4), las perspectivas para el futuro de la química sostenible son esperanzadoras, ya que ha sido muy bien recibida y cuenta con el compromiso de varios países (Halpaap y Dittkrist, 2018).

Figura 4

Comparación entre los avances de la química verde y el deterioro ambiental.



Nota. La química verde está dando pasos lentos con respecto al deterioro de los ecosistemas naturales que está ocurriendo en el mundo.

Química verde en las organizaciones, la educación y el campo

QUÍMICA DE FLUJO CONTINUO Y LABORATORIOS INTELIGENTES

Una propuesta que vemos hoy surgir desde la propia química es la química de flujo continuo. En esta se ha conseguido pasar de técnicas básicas de laboratorio a procesos complejos multietapa en la práctica: es como tener una

planta minicontinua en el laboratorio, por lo que es considerada como el paso de la investigación científica que se hace en el laboratorio a la ingeniería de producción. Dentro de las ventajas que tiene la química de flujo continuo sobre el sistema tradicional de producción por lotes están: a) experimentos seguros con tóxicos y químicos altamente reactivos; b) control de tiempos de reacción efectivos; c) mezcla rápida, y d) descubrimiento rápido de productos de química verde y de rutas sintéticas más ecológicas, a través de la búsqueda de propiedades específicas de productos en plataformas avanzadas, que permiten el diseño de síntesis inversa y reducen significativamente la emisión de contaminantes en el laboratorio y a escala industrial (Fitzpatrick y Ley, 2018). Dentro de los ejemplos de química de flujo continuo está el de celdas de combustible de flujo laminar. Estas utilizan combustibles líquidos como fuente sostenible para generar continuamente energía y agua como subproducto, sin afectar el medio ambiente (Mousavi *et ál.*, 2011). También es posible hallar reactores de flujo continuo que funcionan con fuentes de energía solar. Esta energía es uniforme, de confianza, enorme y prácticamente inagotable, y a partir de ella se puede generar energía química y eléctrica en celdas de flujo solar, o puede ser usada para producir oxígeno o incluso para remover los componentes tóxicos del agua (Elshehribini *et ál.*, 2019; Li *et ál.*, 2020; Pestaña *et ál.*, 2020). Otro ejemplo de aplicación de química verde es el de la captura de gases a base de carbón que generan el efecto invernadero, estos son capturados en forma de microcápsulas o en dispositivos microfluídicos y luego convertidos a productos verdes (Veneman *et ál.*, 2016; Calvino *et ál.*, 2018)

En esta misma dirección, la cuarta revolución industrial ha traído consigo avances en la química verde. Por ejemplo, se están implementando alrededor del mundo los laboratorios inteligentes (*smart lab*), que emplean inteligencia artificial que no es más que una simulación de la inteligencia del hombre aplicada a las máquinas. En estos laboratorios se hace que las máquinas actúen como los científicos lo harían, consiguiendo que estas trabajen en cooperación y coordinación, que diseñen, planifiquen y aprendan de los datos comunes, hagan predicciones y tomen decisiones para resolver problemas de forma autónoma a través del monitoreo de datos como pH,

rendimiento, temperatura, presión, reactivos y flujo, entre muchos otros, que no solo ayudan a controlar los procesos de forma inteligente, sino que los optimizan. De esta manera, no solo aseguran la cantidad y calidad de los productos, sino que también ayudan para que los procesos sean más sostenibles químicamente (Tai *et ál.*, 2020).

Dentro de las ventajas de la ciencia automatizada está la de superar el paso lento de la síntesis a la caracterización de una sustancia, la complejidad de los experimentos y las escalas de simulación. Por ejemplo, Macleod *et ál.* (2020) diseñaron un laboratorio autónomo que sintetiza y caracteriza automáticamente materiales para celdas solares. Por su parte, Burger *et ál.* (2020) desarrollaron un robot auxiliar del laboratorio para investigar procesos de fotocatalisis que es capaz de trabajar ocho días seguidos, por 22 horas al día, realizando 688 experimentos con diez variables experimentales. Además, trabaja a oscuras, lo que significa una enorme ventaja cuando se llevan a cabo reacciones fotosensibles como estas (Tai *et ál.*, 2020; Burger *et ál.*, 2020). Estos ejemplos muestran que ayudados por el desarrollo de la ciencia en todas las áreas del conocimiento podemos avanzar rápidamente en la consolidación de la química verde hacia una condición de sostenibilidad ambiental.

PROPUESTA DE EDUCACIÓN CON CURSOS EN LÍNEA

Como ya se indicó, la popularidad de la química verde ha venido en aumento entre los profesionales relacionados directamente con la química. Sin embargo, quienes no están vinculados de forma directa con esta ciencia, poco la conocen, aunque se sientan interesados en la sostenibilidad. En este sentido, Lose *et ál.* (2020) propusieron un *curso masivo, abierto y en línea* (Massive Open Online Course [MOOC]) como una buena manera de crear conciencia y promover la química verde como herramienta para la sostenibilidad. Ellos indican que la química verde tiene el potencial de cambiar los conceptos de la química tradicional y motivar valores y actitudes proambientales que contribuyan al desarrollo sostenible (Günter *et ál.*, 2017).

Estos cursos tienen la ventaja de ser de acceso libre para cualquier persona y ofrecen educación de calidad a cientos de participantes distri-

buidos por todo el mundo y pueden ser usados como un tipo de formación para toda vida. Una ventaja adicional es que crean comunidades de estudiantes autoorganizados con intereses comunes. Particularmente, el curso de la Universidad de San Jorge es considerado como un modelo pedagógico cognitivo conductual (*cognitive behavioral pedagogical model*), que explora el aprendizaje de los conceptos de la química verde, junto con la economía circular y la sostenibilidad, a través de videoconferencias, material de soporte, actividades por computador, entrega de insignias y espacios de discusión compartido. De esta manera se forman competencias profesionales en las que hay una estrecha relación entre la química comercial, la salud y el medio ambiente (Loste *et al.*, 2020).

PROPUESTA PARA HACER QUÍMICA VERDE EN EL CAMPO

La naturaleza busca medios para cerrar el ciclo de las sustancias químicas que se producen en la atmósfera. El ejemplo presentado en la sección “Puesta en marcha de la química verde” muestra cómo los animales y los humanos toman oxígeno y lo convierten en dióxido de carbono. Este último, a su vez, se transforma en oxígeno por las plantas, con lo que se cierra el círculo ambiental. Sin embargo, el hombre interviene este ciclo cuando deforesta los bosques, normalmente para su propio beneficio, bien sea para cultivar, para la ganadería o la minería o para “despejar”, y que su panorama aparentemente sea más desahogado o espacioso. Todo esto suma una carga elevada al medio ambiente, ya que no solo se está interrumpiendo el ciclo del oxígeno, sino que a su vez se produce dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero, debido a que la gran mayoría de esa materia vegetal es quemada (Gaviria, 2021, p. 17). En el mejor de los casos esto se hace para cultivar productos agrícolas que contribuyen al sostenimiento de la población, pero en muchos otros se realiza para la ganadería, que también provoca emisiones de metano al medioambiente; en el peor escenario, se hace para cultivar coca, marihuana o amapola, entre otros cultivos ilícitos, que infunden negativamente en nuestros jóvenes, destruyen sus familias e impactan en toda la sociedad de forma negativa.

Tales actividades se realizan en Colombia desde pequeñas parcelas hasta grandes extensiones de tierra, y por actores que van desde el campesinado pobre, pasando por el ciudadano urbano que busca un pedazo de tierra para pasar los fines de semana y descansar, hasta los grandes cultivadores o ganaderos, que explotan grandes extensiones lotes baldíos. Por eso es urgente legislar y poner en cintura a aquellos poseedores de tierra que tienen una responsabilidad ambiental. A continuación, se describe el panorama nacional acerca de la sostenibilidad y, finalmente, se desglosa una propuesta encaminada a destinar un mínimo de árboles que se deben tener por metro cuadrado en una propiedad.

Panorama a escala nacional de la sostenibilidad

Colombia es el país con mayor biodiversidad por metro cuadrado del mundo, y cuenta con riquezas que no parecen valorar la mayoría de sus habitantes, aun a pesar de que estas dan soporte a su vida. Entre estas riquezas podemos encontrar bosques, páramos, sabanas, manglares y desiertos que dan agua, aire, suelos y todos los tipos de biomasa a sus residentes. Esta biodiversidad es el producto de la variada geografía y de ecosistemas que hay en el país y que incluye bosques tropicales, bosques de niebla costeros, llanuras abiertas y humedales (Di Palma, 2021). Por tanto, no es sorprendente que Colombia sea la primera a escala mundial en número de aves y orquídeas, la segunda en plantas, anfibios, mariposas y peces dulceacuícolas, la tercera en palmas y reptiles y la cuarta en mamíferos (World Wildlife Fund Colombia, 2020; Poveda, 2021). Pero no es solo rica en su biodiversidad, también tiene un gran potencial para crear empleos en torno a ella, si se cuidan los bosques naturales y se conserva el medio ambiente, ya que hay grandes posibilidades en el ecoturismo, el aviatuismo, el senderismo, el balsaje y el kayakismo en los ríos de Colombia. Además, los páramos y bosques tropicales están llenos de fuentes naturales para el desarrollo de nuevos productos, que pueden servir de base para la fabricación de fármacos, cosméticos, colorantes, odorizantes, saborizantes, resinas, productos genéticos y de biomimética (Poveda, 2021).

Sin embargo, si bien contamos con estas riquezas naturales, Colombia es líder por amenazar la biodiversidad con el punto más crítico situado en los Andes tropicales (Poveda 2021). Una de las causas de ese daño ambiental es la deforestación, motivada principalmente por el deseo de expansión de la frontera agrícola, la ganadera y la tenencia de tierras (en muy pocas manos), que se considera como un sinónimo de riqueza económica, estatus social y político, y que tiene un componente antropológico y sociocultural muy arraigado. Esta situación no solo ha generado un impacto en la deforestación, sino que ha sido una de las principales causas del conflicto armado en Colombia. Es más, después de la firma del Acuerdo de Paz entre el Estado colombiano y la guerrilla de las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia (FARC), las tasas de deforestación aumentaron por parte tanto de actores legales como ilegales (Clerici *et ál.*, 2020; Poveda, 2021).

Por otro lado, el camino habitual para cambiar el uso del suelo en Colombia es el fuego, esto sumado a fenómenos como El Niño y La Niña en menor escala, que provocaron sequías, con lo cual se ha favorecido la quema de la vegetación. Para ponerlo en cifras, solo en el periodo de 2000 a 2016 el promedio de área quemada fue de 20.650 km² por año, y entre el 2001 y 2019 Colombia perdió 4,34 Mha (4.340.000 ha) de bosques y en cambio produjo 1.7 Gt (1.700.000.000 t) de CO₂. Los cinco departamentos más deforestados son Caquetá, Meta, Antioquia, Guaviare y Putumayo. La Amazonia colombiana avanzó con un ritmo de deforestación de 2.000.000 ha en 2018, incluso en áreas protegidas como los Parques Nacionales de Tinigua, Serranía de Chiribiquete, Sierra de la Macarena y la Reserva Nacional Nukak (Finer y Mamani, 2020; Poveda, 2021).

Una de las consecuencias que provoca la deforestación es la falta de agua. Por ejemplo, la deforestación de los Andes tropicales afecta el porcentaje de agua reciclada de la región que es debida a la evapotranspiración de la vegetación local —el agua evaporada del océano Atlántico es poca comparada con la reciclada por los árboles—. Además de esto, parte de este vapor de agua es proveniente de la Amazonia; se condensa y cae como lluvia sobre las montañas, luego se evapora otra vez y hace llover localmente. Por eso, si se afecta la selva amazónica se perjudican no solo los Andes tropicales, sino que

asimismo se desata un cambio en los procesos hidrológicos y climáticos del norte de Suramérica (Staal *et ál.*, 2018; Poveda, 2021). Todo esto sin contar con que también se pone en riesgo el suministro del agua para ciudades como São Paulo, Río de Janeiro, Buenos Aires y Montevideo¹. Además, los incendios del Amazonas producen humo, hollín y carbón negro que son transportados por los sistemas de circulación atmosférica. Por eso no es sorprendente la noche en pleno día que se vivió en São Paulo en agosto de 2019 (Poveda, 2021). Otras dos consecuencias de la deforestación son la afectación de los ríos aéreos (análogos a los ríos superficiales) y la dinámica de transpiración del bosque a través del suelo, la vegetación y la atmosfera, ya que esta protege contra los efectos de la sequía y hace resistente al bosque ante los cambios climáticos extremos (Bedoya-Soto *et ál.*, 2018; Poveda, 2021).

Otro factor importante que está amenazando la biodiversidad es la explotación económica de los recursos naturales en actividades como la minería, la agricultura y la extracción de petróleo, entre otras. Por ejemplo, con respecto a la minería, la contaminación en Colombia es tan grande que ocupa el segundo lugar después de China en niveles más altos de mercurio. Esto va de la mano con procesos de extracción inadecuados, contaminación del suelo y del agua con cianuros y otros metales pesados como el cadmio y el plomo que amenazan la vida silvestre y la seguridad alimentaria de las personas al consumir productos contaminados (Di Palma, 2021).

De esta manera, los humanos nos hemos convertido en asesinos ambientales movidos por el hábito de controlar y dominar el medio ambiente y a los demás seres que habitan en él (Harari, 2014). Actuamos sin pensar que la vida sana depende de nuestra relación con la naturaleza, tal como lo ha demostrado la pandemia del COVID-19, ya que la pérdida de hábitats, la deforestación y el cambio de uso del suelo aumentan el riesgo de enfermedades zoonóticas a partir de animales silvestres amenazados que están siendo desplazados (Ellwanger, *et ál.*, 2020). Todo lo anterior se enlaza con el efecto invernadero que ha provocado el cambio climático: este no solo ha puesto en riesgo a las sociedades humanas, sino que ha encaminado el colapso de la

1 Véase al respecto el capítulo cinco de este libro “El agua es vida: una mirada ecofeminista”.

mayoría de los ecosistemas terrestres y marinos del planeta para 2030 (Trisos *et ál.*, 2020). Semejantes razones deberían bastar para frenar la deforestación a escala global que la humanidad ejerce sobre el planeta (Poveda, 2021).

Por tanto, se requiere con urgencia una regulación rápida para el acceso a los recursos naturales en Colombia, un camino que sea sostenible y que asegure la responsabilidad de todos los actores involucrados. Este compromiso busca alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en especial el objetivo 3 que indica que se debe “garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades”, y solo mediante una relación coherente con la naturaleza podemos conseguirlo (Poveda, 2021). Esto sin contar con la obligación ética que tenemos con las generaciones futuras. No podemos recibir un país con el primer lugar en biodiversidad por metro cuadrado del planeta y entregar a nuestros hijos y su descendencia uno amenazado o destruido en varios de sus ecosistemas. Además, la obligación se extiende más allá de Colombia, al ser el país más biodiverso el que nos correspondió; es una responsabilidad con la humanidad que habita el planeta. El tiempo es ahora, ya que no es posible reconocer la gravedad de las cosas, pero es irreprochable actuar como si se las estuviera negando (Gaviria, 2021).

En más de cincuenta países ya se han elaborado estrategias para cumplir con la economía circular y con los ODS. Sin embargo, en Colombia la carrera apenas comienza: con un proyecto impulsado por el gobierno actual se busca fomentar estrategias para el uso sostenible de los recursos naturales, y se convoca a emprendedores que promuevan la conservación de estos. Así mismo, la Misión de Sabios ha presentado varias propuestas con las que se pretende impulsar el enfoque multisectorial de la bioeconomía. Este hace hincapié en la educación y la formación de habilidades para promover el crecimiento, el desarrollo, la innovación, la tecnología y la investigación de vanguardia (Di Palma, 2021, p. 41). El enfoque en los ciudadanos del futuro está bien porque ellos serán los habitantes del planeta. En cualquier caso, no podemos dejar la responsabilidad solo en ellos, porque hasta ahora se están formando y el cambio es urgente. Tenemos que ser conscientes de que este debe ser progresivo. No es posible pensar que hoy se siembra un árbol

y mañana se recoge su semilla. Por tanto, es apremiante atender no solo la pérdida de la biodiversidad y el cambio climático, sino también procurar el bienestar de las personas mediante modelos de sostenibilidad y proyectos en bioeconomía, con los cuales será posible lograrlo.

La Misión de Sabios también ha propuesto la ampliación de las capacidades científicas del país con el objetivo de desarrollar una economía basada en el conocimiento y la innovación en torno a la biodiversidad (Misión de Sabios, 2020). Pero no solo se ha quedado allí, sino que además ha mostrado las directrices en que nos podemos basar para alcanzar dicho objetivo. A continuación, se describen brevemente algunas de sus propuestas en el foco de biotecnología, bioeconomía y medio ambiente:

1. De acuerdo con el ritmo del crecimiento de la población, se calcula que para 2050 se necesitará el doble de la producción agrícola para poder alimentarla. Una propuesta realizada por la doctora Silvia Restrepo, que además evita la deforestación de los territorios, es el mejoramiento de las especies silvestres, que tienen poco rendimiento y características no deseables para su comercialización. La propuesta no solo busca mejorar la productividad, sino que evita extender las fronteras agrícolas al obtener mejores rendimientos. Está basada en cuatro alternativas: 1) mejoramiento por cruces de ciencia y tecnología, 2) mejoramiento por mutación, 3) mejoramiento por mutagénesis y 4) edición de genomas. Por ejemplo, en el último caso se utiliza la técnica de CRISPR para adecuar los genes de las bacterias atacantes del cultivo con el fin de que no sean resistentes (Khan *et al.*, 2019; Restrepo, 2021).
2. Con la biodiversidad que tiene Colombia, este país puede convertirse en líder de las Américas en el campo de la química verde. Por ahora se ha convertido en uno de los grandes productores de bioetanol, a partir de la caña de azúcar, y de biodiésel, con base en la palma de aceite —hoy en día hay más de 800.000 ha sembradas, 160 municipios y 21 departamentos del país involucrados (Fedepalma, 2020)—. Esa biomasa que se produce puede además

servir como subproducto aprovechable (fibras ricas en celulosa y lignocelulosa), y el aceite de palma puede ser transformado en sustancias oleoquímicas como ácidos grasos, ésteres y alcoholes grasos que pueden sustituir a los derivados de los producidos a partir de fuentes fósiles en sus aplicaciones (Noriega, 2021). La ventaja es que al sembrar estos productos y cuidar los cultivos se está produciendo oxígeno para sus habitantes, y de tal modo se cierra el ciclo que se expuso en la figura 2. Es decir, los recursos biológicos pueden ser utilizados, degradados y luego utilizados de nuevo, mientras que con la quema de combustibles fósiles el círculo queda abierto, lo que no es ambientalmente sostenible. Por lo demás, se está dando empleo a las personas de la región donde se siembran estos productos, y de esta forma se contribuye a romper el conflicto entre el crecimiento económico, la parte social y la ambiental que se ha venido discutiendo.

3. La propuesta realizada por Guy Henry y Elizabeth Hodson es aprovechar al máximo los avances en ciencia, tecnología y desarrollo, para hacer una transformación del conocimiento que tenemos de los recursos terrestres y marinos e impulsar su conservación y aprovechamiento. Todo esto se enmarca dentro del concepto de la cuarta revolución industrial o de tecnologías convergentes en nano- y biotecnologías, bioinformática y ciencias cognitivas (Henry y Hodson, 2021).
4. Marcus Eisenhauer y María del Pilar Noriega proponen un modelo de inversión en la investigación similar al de la sociedad Fraunhofer de Alemania, ya que esta crea empleos (para 2018 la sociedad tenía 26.600 empleados, 72 institutos y unidades de investigación) y ayuda a la innovación de las empresas. Las investigaciones se realizan por contrato con los sectores privado y público. Además, tienen la característica de ser investigaciones dirigidas y aplicadas, y por ello tienen un alto beneficio para la sociedad y una utilidad directa para las empresas, tanto públicas como privadas. La sociedad cuenta con cerca de 30.000 patentes

en la mayoría de las áreas de la investigación. El modelo de investigación obliga a la adaptación constante a los mercados y se va ajustando según las condiciones cambiantes de la ciencia, la industria y el Estado. En este modelo los debates son abiertos y dan lugar a una gran cantidad de propuestas creativas que abren nuevas perspectivas (Eisenhauer y Noriega, 2021).

Las anteriores propuestas son buenas para el país, y máxime cuando en la Constitución de Colombia se consagra el derecho que tienen todos sus habitantes a vivir en condiciones dignas y en un medio ambiente sano. Pero para vivir en tales condiciones debemos pensar en términos ambientales, sociales y económicos, y ya que la mayor riqueza del país es la natural, se debe restaurar, cuidar y conservar, porque destruirla atenta contra el desarrollo sostenible y el futuro del país. No podemos seguir empeñados en nuestra autodestrucción, en favorecer al que daña al medio ambiente; no podemos continuar financiando la quema de combustibles fósiles, que son la principal causa del calentamiento global, y que a su vez tiene un impacto social, ambiental, económico y ecológico (Poveda, 2021).

Aquí se pone en evidencia la urgencia no solo de conservar los recursos naturales que aún están disponibles, sino de restituir los que se han perdido. Esta tarea constituye un deber y una responsabilidad de todos los habitantes del territorio nacional. Por su parte, la responsabilidad del Gobierno es legislar al respecto. Hay muchos esfuerzos positivos que se están haciendo en este sentido, como se ha reseñado previamente. Sin embargo, es necesario revertir el daño que se ha producido a los ecosistemas y la solución está disponible, al alcance de las manos de cualquier persona.

Se debe buscar cerrar el ciclo del oxígeno (figura 2) y esto solo se consigue con la maquinaria que siempre ha estado a nuestra disposición para producir oxígeno: los árboles. Por ejemplo, una ley que puede servir en este sentido debería basarse en lo siguiente: si se considera como promedio aproximado el perímetro de un árbol grande en 20 m, se puede establecer que una cuota máxima de árboles por 100 m² es de 5, o lo que es equivalente a 50 por 1000 m². ¿De qué especie? La que indique un comité de expertos.

La cuota mínima de árboles en esta última propiedad podría ser fijada en la mitad, es decir, 25 árboles por 1000 m². Así, aquellos dueños de tierras que superen esa cuota mínima pueden ser reconocidos como amigos del medio ambiente y su impuesto predial podría reducirse en un porcentaje proporcional al de árboles que tiene de más en su propiedad con respecto a la cuota máxima, mientras que aquellos que tengan un menor número de árboles que el establecido por la cuota mínima (en el ejemplo de 25 árboles), pueden ser sancionados por el costo ambiental producido, y tendrían que pagar un impuesto predial aumentado de forma proporcional al número de árboles que le faltan por completar con respecto a la cuota máxima.

De esta manera, no solo se incentiva la reforestación en el campo, sino que se fomenta el empleo de personas de la región que son las que conocen los procedimientos de siembra y cuidado de los árboles. Como es natural, para toda regla hay excepciones, como el caso de aquellos que siembren la tierra con cultivos destinados a alimentar la población y demuestren su voluntad de acogerse a los planes del Gobierno para mejorar su rendimiento y productividad. Será necesario apoyarlos. Pero si, por el contrario, usan el suelo para plantar cultivos que afecten a la sociedad, como los de coca, amapola y cannabis, entre otros, usados con fines recreativos, a estos vale la pena expropiarlos, ya que no es posible vivir a costa de la desgracia de los jóvenes, sus familias y la sociedad a la que pertenecen. Además de esto, deben ponerse sanciones a quienes deforesten de manera ilegal o legal, e invertir los dineros de las sanciones en la reforestación. Todo esto porque debemos ser honestos y no ponerle un precio al medio ambiente.

Referencias

- American Chemical Society. (2020). *Green chemistry*. <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry.html>
- Anastas, P. T. y Warner, J. C. (1998). *Green chemistry: theory and praxis*. Oxford University Press.
- Anderson, T. R., Hawkins, E. y Jones, P. D. (2016). CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. *Endeavour*, 40(3), 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2016.07.002>
- Beach, E. S., Cui, Z. y Anastas, P.T. (2009). Green chemistry: a desing framework for sustainability. *Energy & Environmental Science*, 2(10), 1038-1049. <https://doi.org/10.1039/B904997P>

- Bedoya-Soto, J. M., Poveda, G. y Sauchyn, D. (2018). New insights on land-atmosphere feedbacks over Tropical South America at interannual timescales. *Water*, 10(8), 1095. <https://doi.org/10.3390/w10081095>
- Burger, B., Maffettone, P. Gusev, V. Aitchison, C., Bai, Y., Wang, X., Li, X., Alston, B., Li, B., Clowes, R., Rankin, N., Harris, B., Sprick, R. y Cooper, A. (2020). A mobile robotic chemist. *Nature*, 583(7815), 237-241. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2442-2>
- Clavinho, K., Laursen, A., Yap, K., Goetjen, T., Hwang, S., Murali, N., Mejía-Sosa, B., Lubarski, A., Teeluck, K., Hall, E., Garfunkel, E., Greenblatt, M. y Dismukes, G. (2018). Selective CO₂ reduction to C3 and C4 oxyhydrocarbons on nickel phosphides at overpotentials as low as 10mV. *Energy Environmental Science*, 11(9), 2550-2559. <https://doi.org/10.1039/c8ee00936h>
- Clerici, N., Armenteras, D., Kareiva, P., Botero, R., Ramirez-Delgado, J., Forero-Medina, G., Ochoa, J., Pedraza, C., Schneider, L., Lora, C., Gomez, C., Linares, M., Hirashiki, C. y Biggs, D. (2020). Deforestation in Colombian protected areas increased during post-conflict periods. *Scientific Reports*, 10(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61861-y>
- Di Palma, F. (2021). Project Colombia: una oportunidad para impulsar una bioeconomía sostenible. En Misión de Sabios (Eds.), *Ciencia y tecnología: Fundamento de la bioeconomía. Propuestas del foco de biotecnología, bioeconomía y medio ambiente* (vol. 3) (pp. 39-50). Vicepresidencia de la República de Colombia-Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación-Universidad de los Andes.
- Eisenhauer, M. y Noriega, M. (2021). El modelo Fraunhofer y la investigación aplicada. En Misión de Sabios (Eds.), *Ciencia y tecnología: Fundamento de la bioeconomía. Propuestas del foco de biotecnología, bioeconomía y medio ambiente* (vol. 3) (pp. 155-163). Vicepresidencia de la República de Colombia-Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación-Universidad de los Andes.
- Ellwanger, J. H., Kulmann-Leal, B., Kaminski, V., Valverde-Villegas, M., Da Veiga, A. B., Spilki, R., Fearnside, P. M.; Caesar, L., Giatti, L., Wallau, G., Almeida, S. Borda, M., Da Hora, V. y Chies J. A. (2020). Beyond diversity loss and climate change: Impacts of Amazon deforestation on infectious diseases and public health. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 91(01), 1-33. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020191375>
- Elschami, M. y Kümeerer, K. (2020). Design of a master of science sustainable chemistry. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 17, 100270. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100270>
- Elshernbini, M., Allemann, R. y Wirth, T. (2019). “Dark” single oxygen made easy. *Chemistry A European Journal*, 25(54), 12486-12490. <https://doi.org/10.1002/chem.201903505>
- Fedepalma. (2020). *La palma de aceite en Colombia*. <http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/infografia-palmadeaceite-colombia-2020.pdf>
- Finer, M., y Mamani, N. (2020). *MAAP Síntesis 2019: Hotspots y tendencias de deforestación en la Amazonia*. <https://maaproject.org/2020/sintesis-2019/>

- Fitzpatrick, D. E. y Ley, S. V. (2018). Engineering chemistry for the future of chemical synthesis. *Tetrahedron*, 74(25), 3087-3100. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2017.08.050>
- Gaviria, A. (2021). Prólogo. En Misión de Sabios (Eds.), *Ciencia y tecnología: fundamento de la bioeconomía. Propuestas del foco de biotecnología, bioeconomía y medio ambiente* (vol. 3) (pp. 13-19). Vicepresidencia de la República de Colombia-Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación-Universidad de los Andes.
- Grafström, J. y Aasma, S. (2021). Breaking circular economy barriers. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126002. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126002>
- Günter, T., Akkuzu, N. y Alpat, S. (2017). Understanding green chemistry and sustainability: an example of problem-based learning (PBL). *Research in Science and Technological Education*, 35(4), 500-521. <https://doi.org/10.1080/02635143.2017.1353964>
- Halpaap, A. y Dittkrist, J. (2018). Sustainable chemistry in the global chemicals and waste management agenda. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 9, 25-29. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2017.11.001>
- Harari, Y. N. (2014). *Sapiens: A brief history of humankind*. Harvill Secker.
- Henry, G. y Hodson, E. Bioeconomía, modelo para un desarrollo territorial sostenible e inclusivo. En Misión de Sabios Colombia (Eds.), *Ciencia y tecnología: fundamento de la bioeconomía. Propuestas del foco de biotecnología, bioeconomía y medio ambiente* (vol. 3) (pp. 165-190). Vicepresidencia de la República de Colombia-Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación-Universidad de los Andes.
- Hjeresen, D., Bose, J. y Schutt, D. (2020). Green chemistry and education. *Journal of Chemical Education*, 77(12), 1543. <https://doi.org/10.1021/ed077p1543>
- Hutchison, J. E. (2019). System thinking and green chemistry: powerful levers for curriculum change and adoption. *Journal of Chemical Education*, 96(12), 2777-2783. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00334>
- Khan, M. Z., Zaidi, S. S., Amin, I. y Mansoor, S. (2019). A crispr way for fast-forward cropdomestication. *Trends in Plant Science*, 24(4), 293-296. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.01.011>
- Kirchhoff, M. M. (2005). Promoting sustainability through green chemistry. *Resources, Conservation and Recycling*, 44(3), 237-243. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.01.003>
- Lenoir, D., Schramm, K.-W. y Lalah, J. (2020). Green chemistry: some important forerunners and current issues. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 18, 100313. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100313>
- Li, W., Zheng, J., Hu, B., Fu, G., Hu, M., Veyssal, A., Zhao, Y., He, J., Liu, T., Ho-Baille, A. y Jin, S. (2020). High-Performance solar flow battery powered by a perovskite/silicon tandem solar cell. *Nature Materials*, 19, 1326-1331. <https://doi.org/10.1038/s41563-020-0720-x>
- Loste, N., Chinarro, D., Gómez, M., Roldán, E. y Giner, B. (2020). Assessing awareness of green chemistry as a tool for advancing sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120392. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120392>

- MacLeod, B. Parlane, F., Morrissey, T., Häse, F. Roch, L., Dettelback, K., Moreira, R., Yunker, Y., Rooney, M., Deeth, J., Lay, V., Ng, G., Situ, H., Zhang, R., Elliott, M., Haley, T., Dvorak, D., Aspuru-Guzik, A., Heint, J. y Berlinguette, C. (2020). Self-driving laboratory for accelerated discovery of thin-film materials. *Science Advance*, 6(20), eaaz8867. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz8867>
- Misión de Sabios (2020). *Colombia hacia una sociedad del conocimiento. Reflexiones y propuestas* (vol. 1). Vicepresidencia de la República de Colombia-Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación-Universidad de los Andes.
- Mousavi, S. A., Nguyen, N. T. y Chan, S. H. (2011). A review on membraneless laminar flow-based-based fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(9), 5675-5694. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.063>
- Noriega, M. (2021). Química verde y la convergencia tecnológica. En Misión de Sabios (Eds.), *Ciencia y tecnología: fundamento de la bioeconomía. Propuestas del foco de biotecnología, bioeconomía y medio ambiente* (vol. 3) (pp. 143-152). Vicepresidencia de la República de Colombia-Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación-Universidad de los Andes.
- Pestaña, C., Hobson, P., Robertson, P., Lawton, L. y Newcombe, G. (2020). Removal of microcystins from a waste stabilization lagoon: evaluation of a packed-bed continuous flow TiO₂ reactor. *Chemosphere*, 245, 125575. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125575>
- Poveda, G. (2021). Garantizar la integridad de los ecosistemas de Colombia. Condición básica para preservar la biodiversidad y desarrollar la bioeconomía. En Misión de Sabios (Eds.), *Ciencia y tecnología: fundamento de la bioeconomía. Propuestas del foco de biotecnología, bioeconomía y medio ambiente* (vol. 3) (pp. 53-96). Vicepresidencia de la República de Colombia-Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación-Universidad de los Andes.
- Restrepo, S. (2021). Biotecnología y agricultura. En Misión de Sabios (Eds.), *Ciencia y tecnología: fundamento de la bioeconomía. Propuestas del foco de biotecnología, bioeconomía y medio ambiente* (vol. 3) (pp. 129-140). Vicepresidencia de la República de Colombia-Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación-Universidad de los Andes.
- Sheldon, R. A. (2018). Metrics of green chemistry and sustainability. Past, present, and future. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(1), 32-48. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03505>
- Smieja, J. M. y Babcock, K. E. (2017). The intersection of green chemistry and Steelcase's path to circular economy. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 10, 331-335. <https://doi.org/10.1080/17518253.2017.1383516>
- Smith, W. y Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales*. McGraw-Hill.
- Staal, A., Tuinenburg, O. A., Bosmans, J. H. C., Holmgren, M., van Nes, E. H., Scheffer, M., Zemp, D. C. y Dekker, S. C. (2018). Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nature Climate Change*, 8, 539-543. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0177-y>

- Tai, X., Zhang, H., Niu, Z., Christi, S. y Xuan, J. (2020). The future of sustainable chemistry and process: Convergence of artificial intelligence, data and hardware. *Energy and AI*, 2, 100036. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2020.100036>
- Trisos, C. H., Merow, C. y Pigot, A. L. (2020). The projected timing of abrupt ecological disruption from climate change. *Nature*, 580, 496-501. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2189-9>
- Tse-Lun, C., Hyunook, K., Shu-Yuan, P., Po-Chih, T., Yi-Pin, L. y Pen-Chi, C. (2020). Implementation of green chemistry principles in circular economy system towards sustainable development goals: Challenges and perspectives. *Science of the Total Environment*, 716, 136998. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136998>
- Tse-Lun, C. y Pen-Chi, C. (2020). Implementation of green chemistry principles in circular economy system towards sustainable development goals: Challenges and perspectives. *Sciences of the total environment*, 717, 136998. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136998>
- United States Environmental Protection. (2020). *Basic of green chemistry*. <https://www.epa.gov/greenchemistry/basics-green-chemistry>
- Vega, J. C. (2018). *Principios y aplicaciones de la energía fotovoltaica y de las baterías*. Santiago, Chile. Ediciones Universidad Católica de Chile. <https://ediciones.uc.cl/principios-y-aplicaciones-de-la-energia-fotovoltaica-y-de-las-baterias.html>
- Veneman, R., Hilbert, T., Brilman, D. y Kersten, S. (2016). CO₂ capture in a continuous gas-solid tricycle flow reactor. *Chemical Engineering Journal*, 289, 191-202. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.12.066>
- World Wildlife Fund Colombia. (2020). *¿Qué es la biodiversidad y por qué perderla importa para las personas?* <https://www.wwf.org.co/?uNewsID=370752>