



QUI

Ana Laura Pino

Química verde

Enfoque sistémico



QUÍMICA VERDE
ENFOQUE SISTÉMICO



UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL LITORAL



Química verde



**UNIVERSIDAD
NACIONAL
DEL LITORAL**

Rector **Enrique Mammarella**

Secretario de Planeamiento Institucional y Académico **Miguel Irigoyen**

Directora Ediciones UNL **Ivana Tosti**

Decano Facultad de Ingeniería Química **Adrian Bonivardi**

.....

Pino, Ana Laura
Química verde : enfoque sistémico /
Ana Laura Pino ; prólogo
de Ester Mercedes Ocampo.
- 1a ed. - Santa Fe :
Ediciones UNL, 2020.
Libro digital, PDF - (Cátedra)

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-987-749-222-4

1. Química. 2. Cuidado del Medio
Ambiente. I. Ocampo, Ester Mercedes,
prolog. II. Título.
CDD 540.7

.....

© Ana Laura Pino, 2020.

© Ester Mercedes Ocampo, 2020.

Consejo Asesor
de la Colección Cátedra

Daniel Comba

Liliana Dillon

Bárbara Mántaras

Gustavo Martínez

Héctor Odetti

Ivana Tosti

Coordinación editorial
María Alejandra Sedrán

Producción general

Ediciones UNL

Coordinación diseño

Alina Hill

Diagramación de interior y tapa

Verónica Rainaudo

—

editorial@unl.edu.ar

www.unl.edu.ar/editorial

.....

© ediciones  UNL, 2020



Química verde

Enfoque sistémico

Ana Laura Pino



COLECCIÓN
CÁTEDRA

Índice

Prólogo / 11

Prefacio / 13

1. INTRODUCCIÓN / 15

1. Concepto de crisis ambiental / 15

2. Algunos desastres ambientales / 16

3. Algunos problemas ambientales / 19

3.1. Acidificación: lluvia ácida / 19

3.2. Efecto invernadero: sustancias que absorben radiación infrarroja / 19

3.3. Destrucción del ozono estratosférico / 20

3.4. Niebla urbana o smog urbano / 21

3.5. Cambio Climático / 21

3.6. Contaminación del agua y Eutrofización / 22

4. ¿Y los químicos? ¿Dónde estamos? / 24

5. Prevención de la contaminación / 26

Referencias bibliográficas / 27

Sitios de interés / 28

Bibliografía / 28

2. SUSTENTABILIDAD. ENFOQUE SISTÉMICO APLICADO

A LOS PROBLEMAS AMBIENTALES / 29

1. Revolución Industrial / 29

2. Modelo económico del mundo industrializado / 30

3. Consecuencias ambientales y sociales del modelo
de crecimiento económico / 32

4. Preparando el camino para el desarrollo sustentable / 33

5. Enfoque sistémico del ambiente / 38

6. Desarrollo sustentable / 39

7. Dimensiones de la sustentabilidad / 41

Conclusiones / 45

Referencias bibliográficas / 46

Sitios de interés / 47

Bibliografía / 47

3. QUÍMICA VERDE. 12 PRINCIPIOS / 49

1. Introducción. Surgimiento de la Química verde / 49

2. Características de la Química verde / 51

3. 12 Principios de Química verde / 54

3.1. Principio 1 / 54

3.2. Principio 2 / 57

3.3. Principio 3 / 58

3.4. Principio 4 / 59
3.5. Principio 5 / 59
3.6. Principio 6 / 61
3.7. Principio 7 / 62
3.8 Principio 8 / 64
3.9. Principio 9 / 65
3.10. Principio 10 / 66
3.11. Principio 11 / 68
3.12. Principio 12 / 69
Conclusiones / 70
Referencias bibliográficas / 71
Sitios de interés / 72

4. INGENIERÍA VERDE / 73

1. Introducción / 73
2. Industria verde: surgimiento y definiciones / 73
3. 12 Principios de Ingeniería verde / 75
3.1. Principio 1 / 75
3.2. Principio 2 / 76
3.3. Principio 3 / 77
3.4. Principio 4 / 78
3.5. Principio 5 / 79
3.6. Principio 6 / 80
3.7. Principio 7 / 81
3.8. Principio 8 / 82
3.9. Principio 9 / 82
3.10. Principio 10 / 83
3.11. Principio 11 / 84
3.12. Principio 12 / 85
4. Ecología industrial / 85
4.1. Introducción / 85
4.2. Parques ecoindustriales / 89
4.3. Experiencias. El caso de Kalundborg / 89
Conclusiones / 91
Referencias bibliográficas / 93
Sitios de interés / 94

Sobre la autora / 95

Índice de figuras

1. INTRODUCCIÓN

- Figuras 1.1 y 1.2. Principales riesgos atribuidos al isocianato de metilo / 18
- Figura 1.3. Mapa de representación de cáncer y neumopatías en Monte Maíz, Córdoba, Argentina / 23
- Figura 1.4. Disciplinas para el estudio del ambiente / 25

2. SUSTENTABILIDAD. ENFOQUE SISTÉMICO APLICADO

A LOS PROBLEMAS AMBIENTALES

- Figura 2.1. Representación del sistema para el modelo de crecimiento económico / 30
- Figura 2.2. Modelo de producción lineal / 31
- Figura 2.3. Catástrofe Malthusiana / 33
- Figura 2.4. Curva de crecimiento de la población mundial / 34
- Figura 2.5. El ambiente como sistema / 39
- Figura 2.6. Dimensiones de la sustentabilidad / 43
- Figura 2.7. Interrelaciones entre las dimensiones de la sustentabilidad / 44

3. QUÍMICA VERDE. 12 PRINCIPIOS

- Figura 3.1. Hitos en la historia de la Química verde / 51
- Figura 3.2. Relación de la qv con otras disciplinas / 52
- Figura 3.3. Características de la biocatálisis / 66

4. INGENIERÍA VERDE

- Figura 4.1. Industria verde: una estrategia en dos frentes / 92

Índice de tablas

3. QUÍMICA VERDE. 12 PRINCIPIOS

- Tabla 3.1. 12 principios de Química verde / 54
- Tabla 3.2. Producción de residuos en diferentes industrias / 56

4. INGENIERÍA VERDE

- Tabla 4. 12 Principios de Ingeniería verde / 75

Dedicado a los niños, ellos y ellas saben.

PRÓLOGO

Ana Laura Pino aborda en su obra una problemática que toda persona que toma decisiones en relación con la química o su enseñanza debería conocer. En un mundo con complejidades crecientes, la prevención de problemas se torna prioritaria dado que es cada vez más costoso revertir las consecuencias de procedimientos que deterioran el ambiente en el que vivimos.

La aplicación de los principios de la Química verde posibilita diseñar etapas de producción más amigables con el entorno y por lo tanto es una herramienta para la mejora de la calidad de vida de los habitantes de zonas cercanas a los centros de producción. Pero debe concientizarse a docentes, profesionales, autoridades y alumnos sobre la necesidad de poner más énfasis en la prevención de daños que evitaría tener que tomar medidas de remediación.

La secuencia lógica seleccionada en esta obra, así como los ejemplos elegidos permiten reflexionar sobre la evolución de la toma de decisiones en el diseño de pequeñas y grandes plantas industriales, sobre grandes catástrofes que pudieron haberse evitado, sobre los impactos de productos y residuos sobre el ambiente y especialmente sobre los cambios de paradigmas relacionados con la problemática ambiental.

Los contenidos de esta obra son muy valiosos para todos los profesionales de la química y disciplinas relacionadas, dado que permiten reflexionar sobre aspectos del *ser* y del *deber ser*, sobre la responsabilidad social de la actividad de los profesionales de la química y sobre la necesidad de trabajar, en forma cooperativa e interdisciplinaria, en el aporte

de soluciones concretas a problemas presentes y futuros asociados con la preservación del ambiente o con el mantenimiento o la mejora de la calidad de vida de individuos viviendo en sociedad.

Los temas abordados son importantes para ampliar la formación de los alumnos de distintas carreras relacionadas con la química y constituyen en sí mismos un aporte a la discusión ontológica, epistemológica y axiológica de la química y de sus aplicaciones concretas.

*Mg. Ester Mercedes Ocampo **
Universidad Nacional del Litoral

* Ingeniera Química. Magíster en Didáctica de las Ciencias Experimentales. Exdocente–investigadora, exdirectora del Profesorado en Química, Universidad Nacional del Litoral.

PREFACIO

Desde sus inicios hace pocos años, y una vez aclarada su diferencia con lo meramente ecológico, duda surgida en relación con la denominación de «verde», la Química verde o Química sustentable cautivó a científicos e industriales por igual.

Los países desarrollados cuentan con centros de investigación y desarrollo de cursos de grado y posgrado, dedicados exclusivamente a la aplicación de la Química verde.

Por otra parte, a pesar de años de educación ambiental, e iniciativas a nivel mundial para buscar soluciones a las problemáticas ambientales, es evidente que los esfuerzos realizados están lejos de ser suficientes.

Ello se debe fundamentalmente a dos cuestiones. Por un lado, la complejidad de dichas problemáticas no puede ser abordada compartimentando disciplinas; y, por otra parte, si queremos *hacer* las cosas en forma diferente necesariamente tendremos que *aprender* diferente.

Por ello, es fundamental apuntar a la sustentabilidad a largo plazo mediante la aplicación de un enfoque sistémico a la conflictividad ambiental. Pasar de un enfoque remediador a un enfoque preventivo y transitar, desde la educación ambiental, a un modelo de educación basado en la sustentabilidad.

Este libro, esfuerzo de años, surge de la necesidad de contar con un texto de cátedra que introduzca a los estudiantes en la complejidad ambiental mencionada, relacionando disciplinas y que, escrito en su idioma de origen, pueda ser

de utilidad a futuros profesionales de diferentes saberes, ambientalmente responsables.

Espero que el mismo transmita a los futuros lectores mi enamoramiento con esta forma de hacer química, y mi sueño de un mundo mejor, más justo, solidario y participativo.

1 Introducción

1. CONCEPTO DE CRISIS AMBIENTAL

Hoy por hoy, un tema de gran actualidad, tanto a nivel global como nacional y local, es el medioambiente y la protección del medioambiente. Cotidianamente escuchamos frases como «Cuidemos al planeta», «Salvemos al mundo» o «Solo tenemos un planeta». Este tema ha movilizado a jefes de Estado de todo el mundo para asistir a cumbres mundiales, además de la creación de redes como instrumentos de coordinación de políticas y colaboración. Investigadores, políticos, educadores, activistas, comunicadores, todos ellos preocupados por el medioambiente, se encuentran hoy enfrentando la misma problemática desde diferentes puntos de vista.

¿Cómo y por qué se llega a esta situación? Si el hombre siempre ha interactuado con su entorno natural, utilizando sus recursos para abastecerse, modificándolo de acuerdo con sus necesidades, ¿cuál es la novedad? ¿Por qué la relevancia de hoy es mayor que la de ayer? ¿Qué ha cambiado?

Podemos obtener una respuesta aceptable visualizando las ideas respecto de la naturaleza, al medioambiente, y cómo estas ideas han ido cambiando con el correr de los años, principalmente en los últimos 50 ó 60 años, es decir de la mitad del siglo xx hacia adelante.

Ese cambio en las ideas tiene que ver con el surgimiento de la idea de *crisis ambiental*, donde a partir del crecimiento económico, planteado como estrategia de desarrollo a partir de la Revolución Industrial, es decir el crecimiento económico como objetivo supremo, se han producido problemas ambientales tan graves, de tal magnitud, que se habla de crisis en el sentido ambiental (Estenssoro Saavedra:94; Anzolín:42; Galano et ál.:1; Galano:5).

Muy a su pesar, el hombre actual se encuentra ante la evidencia irrefutable de que los recursos naturales no son ilimitados, de que no toda transformación es posible, que existen cambios irreversibles a corto plazo y fundamentalmente, que sus acciones tienen consecuencias.

La degradación de los recursos naturales influye significativamente sobre los que menos tienen, sobre los más vulnerables frente a los impactos negativos derivados de los conflictos ambientales.

A esta disminución de los recursos disponibles se suma una explosión demográfica que plantea no solo escenarios futuros preocupantes, sino que establece la necesidad de reformular políticas de Estado y planificaciones.

De aquí entonces, que esta noción de crisis ambiental sea considerada como el problema más importante y urgente de enfrentar por la humanidad en esta etapa de su historia (Federovisky:98; Estenssoro Saavedra:94).

Pero debemos tener bien presente que no existen los problemas ambientales como tales. Los mismos son manifestaciones de problemáticas sociales que impactan sobre el medioambiente. Por ello, se deberá trabajar sobre los problemas sociales, sobre las acciones que el hombre provoca sobre el medioambiente, para hallar la solución (Galano et ál.:1; Estenssoro Saavedra:94).

Como queda muy bien expresado en el *Manifiesto por la vida: por una ética para la sustentabilidad* (Galano et ál.):

La crisis ambiental se manifiesta por una crisis de civilización, crisis de un modelo económico, tecnológico y cultural que ha depredado la naturaleza y que ha negado las culturas y visiones alternas. El modelo dominante degrada el ambiente, subvalora la diversidad cultural y desconoce a los otros; privilegiando la producción y un estilo de vida insustentable, hegemónico y globalizado.

La relación del hombre con la naturaleza ha ido atravesando diferentes etapas a través de la historia, pasando de la conquista de la naturaleza a su explotación y transformación; sin embargo, es a partir de la Revolución Industrial en que esos cambios se aceleran (Anzolin:39).

Es a raíz de innumerables desastres ambientales que poco a poco comienza a tomarse conciencia del impacto de las actividades del hombre sobre el planeta.

2. ALGUNOS DESASTRES AMBIENTALES

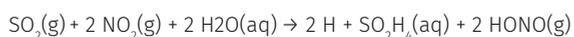
La Gran Niebla de 1952 en Londres fue un fenómeno considerado como uno de los peores desastres ambientales hasta entonces, que ocasionó la muerte de entre 4000 y 12 000 habitantes, y dejó otros 100 000 enfermos.

¿Qué fue lo que sucedió? Las bajas temperaturas generaron un aumento en el uso de carbón, tanto domiciliario para calefacción como industrial. El carbón contenía dióxido de azufre (SO₂) como impureza, y el mismo, al salir por las chimeneas, se combinó con el vapor de agua de la neblina, muy común en Londres, produciendo ácido sulfúrico (H₂SO₄). Las condiciones atmosféricas de bajas temperaturas y alta humedad, persistentes durante

días, ocasionaron que el esmog se mantuviera por tiempo prolongado en la atmósfera baja, provocando graves efectos sobre el sistema respiratorio y cardíaco, sobre todo en ancianos y niños. Además, se vieron afectados el transporte, las comunicaciones y la vida cotidiana de los londinenses (Anzolín:169; Observatorio DKV:21).

Esta situación derivó en la búsqueda e implementación de técnicas de control de la contaminación originada en chimeneas industriales, la utilización de filtros en las mismas, la disminución y/o el reemplazo del carbón como fuente de energía, el control de calidad del carbón, y la implementación de nuevas normativas legales (Estenssoro Saavedra:102).

Cabe destacar que, si bien en ese momento se sabía que las emisiones de carbón provocaban afecciones respiratorias y muerte, no se conocía exactamente cuál era el mecanismo químico (Wang:5). Hoy se conoce que el proceso de conversión del dióxido de azufre en ácido sulfúrico fue facilitado por el dióxido de nitrógeno, otro producto de la combustión del carbón, según la reacción química:



Otro ejemplo refiere al río Cuyahoga en EE. UU. (Ohio – Cleveland). Fue uno de los ríos más contaminados de este país, ardiendo en 13 ocasiones entre 1868 y 1969 debido al crecimiento de la población, que eliminaba sus residuos en el río, a sus actividades industriales y navieras, y a la baja velocidad de circulación de sus aguas. Pocos años después, una ley federal limitó los vertidos y la situación ha mejorado desde entonces.

Quizás sea el Desastre de Bhopal, ocurrido en esa ciudad de la India, el mayor desastre atribuido a la industria química. En 1984 se produjo una fuga importante de isocianato de metilo, un intermediario de la fabricación de pesticidas.

Este líquido, altamente inflamable y tóxico, provocó la muerte de miles de personas, así como consecuencias a largo plazo sobre la salud de la población. Las causas responden a razones económicas, falta de mantenimiento e inversiones, deficiencias en control del riesgo e implementación de medidas de seguridad, en la importancia atribuida a los riesgos inherentes y al uso de sustancias altamente peligrosas.

EXTREMADAMENTE INFLAMABLE



Símbolo: F+ extremadamente inflamable.

Clasificación: líquidos con un punto de inflamación inferior a 23 °C y un punto de ebullición 35 °C de máximo. Gases y mezclas de gases que a presión normal y a temperatura usual son inflamables en el aire.

Precaución: evitar contacto con materiales ignitivos (aire, agua).

Ejemplos: hidrógeno, etino, éter etílico.

MUY TÓXICO



Símbolo: T+ muy tóxico

Clasificación: por inhalación, ingesta o absorción a través de la piel, provoca graves problemas de salud e incluso la muerte.

Precaución: todo el contacto con el cuerpo humano debe ser evitado.

Ejemplos: cianuro, trióxido de arsénico, nicotina, mercurio, plomo, cadmio.

FIGURAS 1.1 Y 1.2. PRINCIPALES RIESGOS ATRIBUIDOS AL ISOCIANATO DE METILO

Fuente: elaboración propia, adaptado de Fichas Internacionales de Seguridad Química

Los desastres ambientales mencionados, y muchos otros, comenzaron a recibir cobertura en un mundo cada día más globalizado, causando un gran impacto en la sociedad. Cuando comenzó a verificarse las consecuencias negativas de la sociedad sobre el medio natural, un desequilibrio de magnitudes sin precedentes, se fue dando una concientización social de la problemática ambiental, apareciendo las primeras corrientes ecologistas y ambientalistas (Estenssoro Saavedra:95–99).

Cabe mencionar escritos científicos como *La primavera silenciosa*, de Rachel Carson, que denunciaba por primera vez el impacto de los plaguicidas sobre la salud humana y el medioambiente, como también las primeras manifestaciones sociales y cumbres mundiales, como la Cumbre de la Tierra (Estocolmo, 1972), donde mandatarios y representantes de todo el mundo se reunieron por primera vez en la historia con el objetivo de discutir el estado del medioambiente mundial (Estenssoro Saavedra:95; Federovisky:85).

3. ALGUNOS PROBLEMAS AMBIENTALES

Por otra parte, junto con estos desastres ambientales se fueron dando otro tipo de fenómenos, los llamados problemas ambientales.

Haciendo la comparación con la salud, así como existen las enfermedades agudas y crónicas, este nuevo tipo de problemas ambientales puede no concentrar la atención del mismo modo; el mismo impacto puntual, pero a largo plazo, puede generar un conflicto aun mayor si no se revierten sus causas, y con una repercusión ya no local sino global. Es decir, un desastre ambiental se diferencia de un problema ambiental no solo en las escalas temporal y espacial, sino también en su impacto sobre el ser humano.

¿De qué *enfermedades crónicas* estamos hablando?:

3.1. Acidificación: lluvia ácida

La lluvia ácida se forma cuando la humedad en el aire se combina con los óxidos de nitrógeno y de azufre emitidos por fábricas, centrales eléctricas y vehículos, por combustión de carbón o productos derivados del petróleo. Cuando se asocian con el vapor de agua, estos gases forman ácidos inorgánicos. Estas reacciones se ven facilitadas asimismo por la presencia de otros contaminantes como ozono o dióxido de carbono. Finalmente, estas sustancias químicas caen a la tierra acompañando a las precipitaciones, la niebla o la nieve, constituyendo la lluvia ácida (Anzolín:172).

Una característica de los contaminantes atmosféricos es que estos pueden recorrer grandes distancias, siendo trasladados por los vientos cientos o miles de kilómetros. Esto afecta a todos los ecosistemas, incluyendo las plantas, los animales, el suelo, las construcciones y edificios, y por supuesto a las mismas personas que originaron el problema, no solo en el lugar preciso de generación de los contaminantes, sino en una extensión mucho mayor.

3.2. Efecto invernadero: sustancias que absorben radiación infrarroja

El efecto invernadero es un fenómeno por el cual ciertos gases retienen parte de la energía emitida por el suelo tras haber sido calentado por la radiación solar. Se produce, por lo tanto, un efecto de calentamiento similar al que ocurre en un invernadero, con una elevación de la temperatura (Anzolín:178).

Aunque el efecto invernadero se produce por la acción de varios componentes de la atmósfera planetaria, en forma natural, el proceso de calentamiento ha sido acentuado en las últimas décadas por la acción del hombre, con la emisión de dióxido de carbono, metano y otros gases. Estos gases intervinientes son conocidos como Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Es importante tener en cuenta que el efecto invernadero es esencial para la vida humana en la Tierra. El problema radica en la contaminación ya que, en una situación de equilibrio, la cantidad de energía que llega al planeta por la radiación solar se compensa con la cantidad de energía radiada al espacio; por lo tanto, la temperatura terrestre se mantiene relativamente constante. Este equilibrio se ve alterado cuando aumenta la generación antrópica de los GEI.

Entre el conjunto de importantes cambios que el efecto invernadero origina en el clima y, por tanto, en nuestro entorno, se encuentran algunos tan relevantes como es el deshielo de los casquetes polares. Esto trae aparejado un aumento del nivel del mar que podría llevar a inundar ciudades y poblaciones, las cuales deberían dejar sus hogares y migrar en ese caso.

Otra de las consecuencias más relevantes del efecto invernadero es el aumento de la desertización, debido al aumento de las temperaturas junto con la escasez de lluvias. Estos cambios meteorológicos mencionados afectan a la agricultura, lo cual implica un riesgo en la provisión de alimentos a la población mundial.

3.3. Destrucción del ozono estratosférico

El ozono forma una capa protectora de la atmósfera que se encuentra entre 15 y 50 km de la Tierra. Tiene como función filtrar las radiaciones ultravioletas (uv) que llegan a la Tierra, actuando como un escudo protector. Estas radiaciones son perjudiciales para la salud humana (alteración del sistema inmunológico, riesgo de contraer cáncer de piel y cataratas), para la vida animal y vegetal (reducción de los ritmos de crecimiento), y afectan asimismo a los organismos microscópicos de los océanos, alterando los equilibrios ecosistémicos acuáticos.

Se ha comprobado científicamente que el cloro y el bromo presentes en productos químicos constituyen sustancias que provocan un adelgazamiento de la capa de ozono. Una molécula de cloro es capaz de romper 100 000 moléculas de ozono (Anzolín:176). Por ejemplo, los clorofluorocarbonos (CFC) son sustancias químicas utilizadas en sistemas de refrigeración, espumas aislantes, extintores de incendio, solventes, sistemas de acondicionadores de aire y en algunos envases desechables.

Si bien actualmente existen protocolos de prohibición en el uso de dichos compuestos (Protocolo de Montreal de 1987 y sus enmiendas posteriores), se presentan inconvenientes debido a que sus moléculas son muy estables, con una capacidad de supervivencia de 50 a 100 años, sumado a que aún se encuentran en vigencia plazos de eliminación para países en vías de desarrollo (Camilloni y Vera:77; Anzolín:177).

3.4. Niebla urbana o esmog urbano

Este tipo de contaminación atmosférica, a diferencia de la niebla de Londres, ocurre en climas cálidos y secos, donde contaminantes como vapores de hidrocarburos y otros compuestos orgánicos volátiles, originados por combustión de combustibles fósiles en el transporte y en la generación de energía eléctrica, junto con óxidos de nitrógeno, se combinan en presencia de luz solar. Ello provoca principalmente problemas respiratorios como asma, y problemas de alergia, afectando especialmente a niños y ancianos, es decir a los más vulnerables (Observatorio DKV:31).

3.5. Cambio Climático

Por Cambio Climático (cc) se entiende una variación significativa y persistente en el clima y todos los parámetros meteorológicos (temperatura, presión, precipitaciones, nubosidad), que altera la composición natural de la atmósfera y afecta a todos los seres vivos, durante un período prolongado de por lo menos algunas décadas. Algunas veces se utiliza inapropiadamente como término sinónimo de calentamiento global.

El cc puede producirse en cierta medida por causas naturales, como por ejemplo cuando se presentan variaciones en la energía solar, pero se está dando principalmente por acciones antropogénicas. Este último es el caso de la variación en la composición química de la atmósfera que se mencionaba anteriormente, con la generación de GEI y la deforestación, que altera la superficie cubierta terrestre (Camilloni y Vera:58; Anzolin:178).

Las principales consecuencias del cc son derretimiento de los glaciares, incremento del nivel del mar, aumento o disminución de las precipitaciones —lo que da lugar a inundaciones o sequías—, aumento de eventos climáticos extremos, por mencionar algunos ejemplos, pero también aumento de la vulnerabilidad de los más pobres e impactos en la salud, no solo por la aparición de enfermedades relacionadas, sino por causas traumáticas o psicológicas debido a pérdidas, migraciones, etc., causadas por la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos (Centro para la Pobreza y Medio Ambiente:8).

La relación entre cc y migración es compleja, ya que intervienen factores políticos, económicos, culturales, pero hoy se presenta como una realidad teniendo en cuenta todos aquellos casos donde las personas deben emigrar al quedarse sin recursos o sin tierras, ya sea por un desastre ambiental puntual o por un deterioro ambiental irreversible en el corto plazo. Son los llamados migrantes ambientales, y las proyecciones alertan sobre millones de ellos en el mundo (el Grupo Internacional sobre Migración y Justicia Climática, por ejemplo, habla de entre 25 y 50 millones de personas desplazadas por año debido a desastres climáticos) (Durán:11).

Por la complejidad de los factores involucrados, que tienen que ver no solamente con cuestiones climáticas sino también sociales, económicas y tecnológicas, y debido al desconocimiento real de las condiciones que se darán a futuro, es que los científicos se encuentran actualmente utilizando diferentes modelos de simulación de posibles escenarios en lo que se refiere a cambios en el clima planetario. Ello permite obtener tendencias, las cuales deberían tenerse en cuenta en las planificaciones gubernamentales.

3.6. Contaminación del agua y eutrofización

Los ríos, lagos, lagunas y otros cuerpos de agua poseen la capacidad de autodepurarse, es decir, mantener, dentro de ciertos parámetros, el equilibrio en los ecosistemas acuáticos, entre los organismos que viven en ellos, con los nutrientes que necesitan.

Cuando las industrias eliminan sus efluentes en ellos, cuando se superan ciertos límites, se produce una saturación, un desequilibrio por exceso de nutrientes, lo que se traduce en la supremacía de unas especies sobre otras. Ello se conoce como eutrofización de las aguas, que tiene entre otras consecuencias la generación de un ambiente acuático con ausencia de oxígeno, con las implicancias sobre la vida que esto representa. Algunos ejemplos en nuestro país son la eutrofización del lago San Jorge, Córdoba, o la mortandad de peces en el río Paraná, debido al aumento de temperatura del agua, la contaminación con agrotóxicos y la mayor vulnerabilidad de las especies acuáticas.

La situación se agrava y complejiza si se tiene en cuenta que el agua es un recurso natural que es considerado cada vez más regularmente como recurso natural no renovable, y se ha convertido en un recurso estratégico del siglo XXI. El CC y la mayor ocurrencia de eventos extremos (sequías e inundaciones), el aumento poblacional, el consumo tanto industrial como agrícola ganadero, las tecnologías disponibles (y sus costos) para desalinizar, son todos factores que impactan negativamente sobre el acceso al agua.

Por otra parte, dado el carácter planetario de la atmósfera, los fenómenos relacionados con la contaminación atmosférica suelen ser los que alcanzan mayor difusión a nivel de la información general; fenómenos como el smog, la inversión térmica, la lluvia ácida, el efecto invernadero y el mal llamado «agujero de ozono», nos hacen sentir que todos estamos involucrados (Camilloni y Vera:85).

En nuestro país, por ejemplo, cabe mencionar la problemática ambiental que relaciona la utilización de agroquímicos con sus efectos sobre la salud humana, donde lo ocurrido en la localidad de Monte Maíz de la provincia de Córdoba, constituye un caso emblemático. A partir de un relevamiento realizado por docentes y estudiantes de la Universidad Nacional de Córdoba,

los datos obtenidos mostraron una incidencia de cáncer y neumopatías que triplica o cuadruplica el promedio, tanto a nivel provincial como nacional (Avila Vazquez et ál.:21).

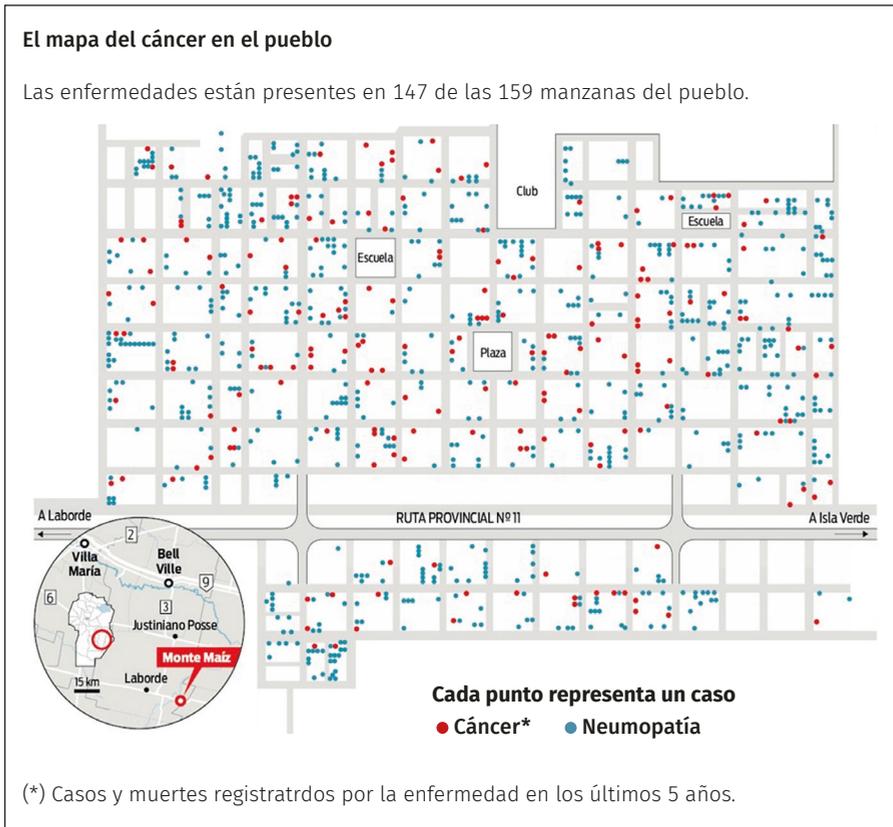


FIGURA 1.3. MAPA DE REPRESENTACIÓN DE CÁNCER Y NEUMOPATÍAS EN MONTE MAÍZ, CÓRDOBA, ARGENTINA

Fuente: relevamiento realizado por docentes y estudiantes de la UNC. *La voz del interior*

Estos son solo algunos de los conflictos ambientales vigentes, a los que deberían sumarse la deforestación, el deterioro de los suelos, la problemática de los residuos, la pérdida de la biodiversidad, en una larga lista de situaciones apremiantes que sirven para fundamentar la idea de crisis ambiental.

4. ¿Y LOS QUÍMICOS? ¿DÓNDE ESTAMOS?

Ahora incorporémonos a nosotros mismos, al ser humano en general o a los químicos en particular, en este panorama.

Durante el siglo xx la química cambió para siempre el modo en que vivimos, y hoy es inseparable de nuestra forma de vida, de los productos que utilizamos a diario. Tal vez los mayores beneficios percibidos por el público en general, han venido de la mano de la industria farmacéutica, con el desarrollo de antibióticos, que han aumentado la expectativa de vida; y de la industria de alimentos, que ha mejorado la calidad de vida de miles de personas (Galano et ál.:4). Pero a la vez, la industria química ha llegado a ser vista como una de las principales responsables de la contaminación ambiental.

De hecho, es la industria que utiliza y libera la mayor cantidad y variedad de sustancias tóxicas al medioambiente. Es innegable que los químicos con sus desarrollos han contribuido sustancialmente a contaminar suelo, agua y aire, y lo siguen haciendo, basta mencionar la problemática actual con los agroquímicos y su efecto sobre la salud de las poblaciones «fumigadas» (Avila Vazquez et ál.), pero esa responsabilidad debe extenderse a políticos, economistas, empresarios, no solo a los químicos.

También es cierto que los químicos comprometidos en el desarrollo de productos químicos y procesos nunca se han propuesto causar daño al medioambiente o a la vida humana. Estos han ocurrido por falta de conocimiento en algunos casos, especialmente de los efectos a largo plazo de productos liberados al medioambiente, y probablemente un exceso de confianza en los métodos utilizados en la obtención de productos. Y es muy cierto también que los científicos químicos participan activamente en la búsqueda de soluciones para los problemas ambientales.

El desafío de la industria química en el siglo xxi es continuar generando los beneficios que se han logrado, de una manera económicamente viable, pero sin los efectos adversos sobre el entorno natural ni sobre la salud de la población.

La concientización por parte de la sociedad de los problemas ambientales mencionados, el surgimiento de organizaciones ecologistas y ambientalistas, y movimientos en todo el mundo, así como la realización de cumbres mundiales y la presentación de escritos científicos que alertan sobre la crisis ambiental y sus consecuencias sobre la vida del ser humano —y que llegan en algunos casos a comprometer la misma— ponen en escena a la Química ambiental.

La Química ambiental es el estudio de las fuentes, reacciones, transporte, efectos y destinos de las sustancias químicas en el agua, el suelo, el aire y los seres vivos. Su surgimiento y aplicación supuso un gran avance, en un momento donde se consideraba a la dilución de los contaminantes como la mejor solución. La imagen inicial del químico ambiental era la del especialista que acudía a solucionar los problemas, destacando que los mismos, ya sea un derrame de petróleo, una mortandad de peces, una población

contaminada, etc., ya habían sucedido. La Química ambiental es entonces, la aplicación de la Química a la resolución de los problemas ambientales, con una actitud netamente remediadora. Es lo que en ingeniería se conoce como solución de final de tubería o *end of pipe* en su idioma de origen. Ejemplos de ello son las técnicas de remediación de suelos, o los tratamientos de efluentes industriales.

Sin embargo, si bien el nacimiento de la Química ambiental, a la par del mayor grado de conciencia social respecto a las consecuencias de las acciones del ser humano sobre su entorno pueden considerarse como un avance significativo, debemos cuestionarnos si ha sido suficiente, o si debemos repensar las cosas desde otra perspectiva.

El ambiente, definido por Ernst Hajek, como «un sistema global complejo, de múltiples y variadas interacciones, dinámico y evolutivo en el tiempo, está formado por los sistemas físico, biológico, social, económico, político y cultural en que vive el hombre y demás organismos».

Mientras se siga compartimentando los distintos aspectos de la problemática ambiental, químicos, por un lado, legisladores, economistas, ciudadanos, o educadores por otro, no se lograrán avances significativos para alcanzar las soluciones deseadas (Brailovsky:2). Porque los problemas ambientales poseen una complejidad inherente a los mismos. Y porque los problemas complejos, necesitan imprescindiblemente de un tipo de abordaje muy diferente de los tradicionales (Brailovsky:3; Galano et ál.:3; Galano:9). La Figura 1.4 muestra las disciplinas que necesariamente deben estar involucradas en el estudio del ambiente.



FIGURA 1.4. DISCIPLINAS PARA EL ESTUDIO DEL AMBIENTE
Fuente: elaboración propia

5. PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

Recién en las últimas dos décadas comenzó a tomar cuerpo la idea de que la mejor forma de solucionar los problemas originados por los contaminantes es no generarlos. Este enfoque traslada los controles ambientales desde su lugar tradicional (a continuación del proceso productivo) hacia el proceso productivo mismo (al cual deben ser integrados).

Pero para lograr esta integración, es necesario cambiar la forma de pensar la problemática ambiental y evolucionar desde una planificación remediadora (en la que los contaminantes deben ser eliminados de los efluentes y residuos después de haber sido generados) hacia una preventiva, cuyo objetivo es introducir en el proceso de producción las modificaciones necesarias para minimizar (o eliminar si es posible) tanto la generación de residuos y efluentes como la utilización de sustancias tóxicas. Cambios y mejoras en los procesos productivos, utilización de tecnologías limpias, gestión de residuos y ecología industrial, son algunos ejemplos de ello.

La Química verde actúa incorporándose en cada etapa de un proceso productivo con actitud netamente preventiva y siempre con un *enfoque sistémico*, es decir, atacando cada una de las etapas, estudiando cada paso en particular, y fundamentalmente las interacciones posibles entre los subsistemas involucrados, sin perder de vista la totalidad del sistema ambiental.

La necesidad de reducir o eliminar el uso o generación de sustancias peligrosas en el diseño, fabricación y aplicación de los productos químicos de manera tal de prevenir la contaminación, pone al químico ante un cambio muy importante, tanto en la forma de encarar la resolución de los problemas, como en su formación profesional.

El objetivo de la prevención de la contaminación es reemplazar los procesos o los productos que producen consecuencias ambientales negativas, por otros procesos o productos menos contaminantes, disminuyendo asimismo el riesgo a la salud humana. Es importante tener en cuenta que la liberación de contaminantes y sustancias tóxicas al medioambiente (incluyendo las derivadas de accidentes) debe considerarse como un defecto del proceso o del producto final, con costos asociados que incluyen materia prima desperdiciada, costos de gestión, de tratamiento y de disposición final, para cumplir con la normativa ambiental vigente en cada situación.

Es por ello que en las estrategias preventivas, los beneficios económicos, la calidad de vida y la calidad medioambiental están directamente relacionadas: al mejorar una, automáticamente mejoran las demás. Y esta es la principal ventaja sobre las estrategias remediadoras.

Referencias bibliográficas

- ANZOLÍN, A.** (2006). *Lazos verdes. Nuestra relación con la naturaleza*. Buenos Aires, Argentina: Maipue. Prólogo de Guillermo Priotto.
- AVILA VAZQUEZ ET ÁL.** (2015). *Evaluación de la salud colectiva socio-ambiental de Monte Maíz*. Recuperado de <http://reduas.com.ar/evaluacion-de-la-salud-colectiva-socio-ambiental-de-monte-maiz/>
- BRAILOVSKY, A.** (2007). Historia ecológica y educación ambiental. *Anales de la educación común*, 3(8), 36–41. Recuperado de <http://servicios.abc.gov.ar/lainstitucion/stacomponents/16&page=Art%C3%ADculos&IdArticulo=571>
- CAMILLONI, I. Y VERA, C.** (2012). *El aire y el agua en nuestro planeta*. Buenos Aires, Argentina: Eudeba.
- CENTRO PARA LA POBREZA Y MEDIO AMBIENTE** (2009). *La integración de los vínculos entre pobreza y medio ambiente en la planificación nacional de desarrollo: un manual de buenas prácticas*. EE. UU.: PNUMA. Escritora/Coordinadora del Proyecto: De Coninck, S. Recuperado de <https://www.unpei.org/sites/default/files/publications/Handbook%20Spanish.pdf>
- DURÁN, D.** (2016). *Proyectos ambientales y sustentabilidad*. Buenos Aires: Lugar Editorial SA.
- ESTENSSORO SAAVEDRA, E.** (2007). *Antecedentes para una historia del debate político en torno al medio ambiente: la primera socialización de la idea de crisis ambiental*. Recuperado de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-23762007000200007
- FEDEROVSKY, S.** (2011). *Historia del medio ambiente. La transformación de la naturaleza*. Prólogo de Leonardo Moledo. Buenos Aires, Argentina: Capital Intelectual.
- GALANO, C.** (2009). *Crisis ambiental: Reterritorialización del Saber, el lugar y los sujetos*. Colección de cuadernillos de actualización para pensar la Enseñanza universitaria, 4(5), 5–14. Recuperado de <https://www.unrc.edu.ar/unrc/academica/docs/publicaciones/cuadernillo-5-2009.pdf>
- GALANO, C. ET ÁL.** (2002). *Manifiesto por la vida. Por una ética para la sustentabilidad*. Recuperado de <http://www.pnuma.org/educamb/documentos/Manifiesto.pdf>, o <http://www.redalyc.org/articuloaa?id=31713416012>, o <http://www.scielo.br/pdf/asoc/n10/16893.pdf>
- OBSERVATORIO DKV DE SALUD Y MEDIO AMBIENTE DE ESPAÑA** (2010). *Contaminación atmosférica y Salud*. España: DKV Seguros.
- WANG, G. ET ÁL.** (2016). *Persistent sulfate formation from London Fog to Chinese haze*. Artículo presentado en Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Recuperado de <http://www.pnas.org/content/pnas/early/2016/11/09/1616540113.full.pdf>

Sitios de interés

ECODES: <http://www.ecodes.org/salud-calidad-aire/201302176118/Las-causas-de-la-contaminacion-atmosferica-y-los-contaminantes-atmosfericos-mas-importantes>

FICHAS INTERNACIONALES DE SEGURIDAD QUÍMICA: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/0a100/nspn0004.pdf>

PANEL INTERGUBERNAMENTAL SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO IPCC: http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml

RED ARGENTINA DE MUNICIPIOS FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO:
www.ramcc.net

YOUTUBE: videos del desastre de Bhopal de la Revista *National Geographic*

Bibliografía

CARSON, R. ([1962] 2005). *La primavera silenciosa*. Madrid: Crítica.

DÍA DE LA TIERRA: [HTTP://EARTHWEEK1970.ORG/](http://earthweek1970.org/)

EARTH DAY ORG: <https://www.earthday.org/>

JANKILEVICH, S. (2003). *Las Cumbres mundiales sobre el ambiente. Estocolmo, Río y Johannesburgo. 30 años de Historia Ambiental*. Buenos Aires: Área de Estudios Ambientales y Urbanos. Universidad de Belgrano.

SECRETARÍA DE AMBIENTE Y DESARROLLO SUSTENTABLE (Comp.) (2015). *Inundaciones urbanas y cambio climático. Recomendaciones para la gestión*. Buenos Aires: Abrapalabra consultora.

2 Sustentabilidad. Enfoque sistémico aplicado a los problemas ambientales

1. REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

La Revolución Industrial es apreciada como la época de mayor cambio económico y tecnológico de toda la historia, ya que supuso el paso de una sociedad tradicional basada en la agricultura y el comercio, a una nueva sociedad industrial. Constituyó un proceso gradual, que comenzó a mediados del 1800 y supuso una gran transformación en la producción de artículos, que dejan de fabricarse manualmente, artesanalmente, para producirse en grandes fábricas mecanizadas.

La Revolución Industrial comenzó con la mecanización de las industrias textiles y el desarrollo de los procesos del hierro. La expansión del comercio fue favorecida por la mejora de las rutas de transportes y posteriormente por el nacimiento del ferrocarril.

Al mejorar los medios de producción, y con la posibilidad de trabajo asegurado, se produjo una migración masiva del campo a las ciudades para trabajar en las fábricas, dando surgimiento a una nueva sociedad urbana y a la clase obrera (Arístides y Mata de Grossi:40).

En esta época, los cambios se evidenciaron en todos los aspectos de la vida cotidiana: cambios económicos, por supuesto, pero también sociales, culturales, científicos y tecnológicos. Nuevas máquinas, nuevos procesos de producción, nuevas formas de realización del trabajo, nuevas formas de vida colaboraron para un desarrollo industrial nunca visto hasta ese momento (Arístides y Mata de Grossi:15–21).

La producción masiva de alimentos, los desarrollos en salud, y los cambios en la vivienda y condiciones de vida redujeron notablemente las tasas de mortalidad, y ello provocó un aumento de la población mundial, concentrada en las nuevas ciudades industrializadas, en un proceso de urbanización desordenado (Arístides y Mata de Grossi:385–387; Anzólín:40).

Por otra parte, la utilización de carbón en las nuevas fábricas y medios de transporte de las sociedades urbanas industrializadas supone el comienzo de los problemas de explotación de los recursos naturales, de contaminación derivada del uso de combustibles fósiles, y de producción de grandes cantidades de residuos en las ciudades, tanto urbanas como industriales, problemas que permanecen hasta la actualidad (Anzólín:40).

Es decir, es en ese momento de la historia en el que se modifica sustancialmente la relación del ser humano con su entorno, no solo por la aparición de las ciudades, sino por el comienzo de una explotación agresiva y desordenada de los recursos naturales que al día de hoy parece no poseer límites. El hombre de la Revolución Industrial se encuentra en un momento histórico único, con recursos a su disposición, a los que imagina inagotables, con nuevos conocimientos y aplicaciones científico–tecnológicas, y olvida saberes ancestrales para sentirse superior a la naturaleza, a la cual hay que dominar y ordenar.

2. MODELO ECONÓMICO DEL MUNDO INDUSTRIALIZADO

El modelo económico de crecimiento y desarrollo surgido de la Revolución Industrial otorgaba un papel preponderante a la economía como medio para mejorar la calidad de vida de la población, y disociaba definitivamente al hombre de su entorno natural. Para explicarlo gráficamente, se veía al subsistema socioeconómico separado del subsistema ecológico, los recursos naturales, y asignaba a estos últimos solo las funciones de bienes disponibles para su aprovechamiento y vertedero de residuos (Gaviño, 2002:1; Anzolín:42). En la Figura 2.1 se evidencia la preponderancia del sistema socioeconómico por sobre todos los demás.

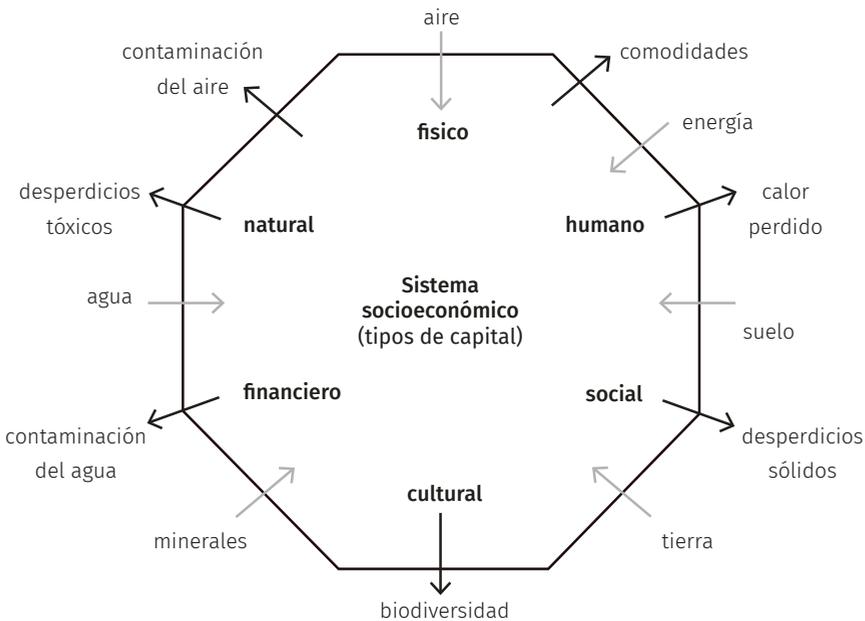


FIGURA 2.1. REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA PARA EL MODELO DE CRECIMIENTO ECONÓMICO

Fuente: elaboración propia

El modelo de producción propuesto es entonces un modelo lineal, donde los recursos naturales se extraen, son procesados y transformados en productos en una industria, y luego la sociedad los compra, utiliza y desecha. Se basa entonces en la concepción de recursos naturales infinitos, y genera enormes cantidades de residuos que necesitan de cada vez mayor espacio para su disposición final.

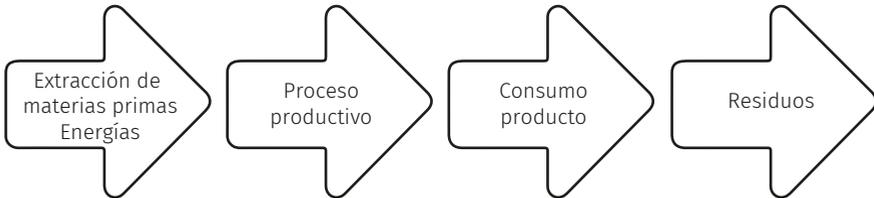


FIGURA 2.2. MODELO DE PRODUCCIÓN LINEAL

Fuente: elaboración propia

Más adelante en la historia, el reemplazo del carbón por el petróleo como fuente de energía, la utilización de la electricidad en la producción industrial, los cambios en los medios de transporte y las comunicaciones completaron estos años de grandes modificaciones sociales.

La producción industrial se ve afectada debido a las guerras mundiales del siglo xx, sumado a que, hasta ese momento, los productos se hacían de calidad, para durar toda la vida. Para mantener este sistema lineal de producción, este modelo de crecimiento económico, se hacía necesario garantizar el consumo. Es decir, en un momento dado era más fácil producir que vender; entonces la calidad de los productos y su durabilidad comienzan a verse como obstáculos que atentan contra el crecimiento económico.

Es en EE. UU., entre 1930 y 1950, donde se inician dos estrategias conjuntas. Por un lado, la idea de transformar al ciudadano en un consumidor, pero en un consumidor insatisfecho. Para ello se utilizan el marketing y la publicidad para generar el deseo de obtener siempre algo nuevo. Surge así lo que conocemos como *sociedad de consumo*, término utilizado en economía y sociología, y que se caracteriza por el consumo y la producción masivos de productos, y donde el estilo de vida reemplaza el concepto de suficiencia por el de felicidad a través de la abundancia (Guimaraes:65, 78).

Por otra parte, se modifica el diseño industrial de modo que los productos tengan una fecha de caducidad determinada. Ello recibe el nombre de *obsolescencia programada*. La obsolescencia programada u obsolescencia planificada es la reducción intencional de la vida útil de un producto para aumentar la venta y consumo del mismo. Se programa el fin de la vida útil de un producto desde el diseño mismo, para que luego de un tiempo se torne obsoleto, no funcional, inútil o inservible —por ejemplo por falta de

repuestos—, y haya que comprar otro nuevo que lo sustituya. Al estar implicados la utilización de la tecnología al servicio de un objetivo: influir sobre el consumidor desde diferentes medios comunicacionales y mediante estrategias económicas de mercado, la obsolescencia programada recibe también otros nombres, como obsolescencia tecnológica, obsolescencia psicológica, progresiva o dinámica, según sea el caso.

Estas estrategias conjuntas tenían como objetivo la reactivación y el crecimiento de la economía: mayor consumo implica la necesidad de mayor producción, a su vez el aumento de la producción implica generación de empleo; y los nuevos trabajadores, al estar empleados e inmersos en las estrategias comunicacionales mencionadas, adquieren bienes y servicios. De esta manera, el modelo de crecimiento económico tuvo éxito, y aún hoy lo tiene. Pero también tuvo consecuencias no planificadas.

3. CONSECUENCIAS AMBIENTALES Y SOCIALES DEL MODELO DE CRECIMIENTO ECONÓMICO

El modelo de crecimiento basado puramente en lo económico tuvo impactos negativos en los aspectos medioambientales y sociales (Guimaraes:56; Lozano:1843). Por un lado, la extracción indiscriminada de recursos naturales, en muchos casos no renovables, provocó y continúa provocando alteraciones en los ciclos geofísicos que se dan naturalmente en el suelo, deforestación, desertificación y pérdida de la biodiversidad, es decir, alteraciones en los ecosistemas. El aumento poblacional y la concentración de población urbana generaron —y continúan haciéndolo— contaminación de agua, suelo y aire, y acumulación de grandes cantidades de residuos que superan la capacidad de carga del entorno natural para hacer frente a estas alteraciones.

El modelo lineal de producción industrial colabora en gran medida con los problemas de contaminación y generación de residuos y de generación de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) que provocan un aumento de la temperatura media mundial, componente fundamental del cambio climático.

Las grandes guerras mundiales afectaron a la producción industrial y por supuesto a la población mundial, y el período de paz a su término significó un impacto positivo en ambos casos. Por un lado, la producción industrial aumentó, y de allí la necesidad de implementación de estrategias de venta y consumo antes mencionadas; y por otro, la sociedad industrializada, incluida la actual, vio mejorada en muchos aspectos su calidad y esperanza de vida. Pero este modelo provoca fuertes desequilibrios que conducen a situaciones de inequidad social y pobreza, deja expuestos a grupos vulnerables (mujeres, niños, ancianos y pueblos originarios) por ser los que menos tienen, y provoca grandes diferencias entre países desarrollados y en vías de desarrollo (Anzolín:42).

Estos efectos se interrelacionan y potencian en muchos casos. Por ejemplo, son los más humildes los que menor capacidad tienen para enfrentar un desastre ambiental, los que son más vulnerables a las enfermedades, y si bien están muchas veces excluidos de esta sociedad de consumo, simplemente porque poseen sus necesidades básicas insatisfechas, no por ello dejan de querer formar parte de ella a cualquier costo, generando situaciones de violencia e inseguridad.

4. PREPARANDO EL CAMINO PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE

Previamente a la aceptación de la idea de crisis ambiental (ver Introducción), algunos estudios alertaron sobre la situación mundial relacionada con la población y producción de alimentos (Anzolin:271–276).

Uno de los primeros fue el polémico estudio de Malthus, alrededor del 1800 (Malthus, 1826). Este religioso, de formación en economía y demografía, sostenía que la población crecía con una tendencia geométrica o exponencial, mientras que los recursos naturales lo hacían aritméticamente. Por lo tanto, concluía, se avecinaba una catástrofe por falta de alimentos para satisfacer a toda la población, y predijo que ocurriría en 1880, como se muestra en la Figura 2.3.

La teoría malthusiana

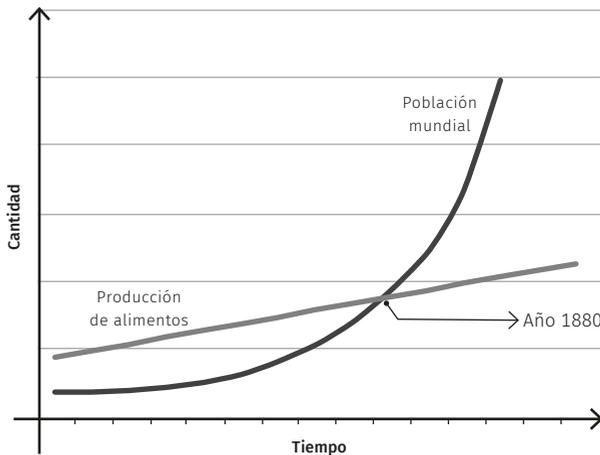


FIGURA 2.3. CATÁSTROFE MALTHUSIANA

Fuente: elaboración propia

Para evitar la catástrofe, Malthus proponía dos tipos de controles: lo que él llamaba control preventivo de la natalidad, esto es retraso del matrimonio y de la procreación, y abstinencia en las relaciones conyugales; y por otro lado, control positivo para referirse a cualquier alternativa que disminuyera la esperanza de vida, como por ejemplo malas condiciones laborales, enfermedades, hambrunas y guerras (Malthus, 1826). Este último tipo de controles estaba dirigido a los sectores más pobres, y se evidencia en una de sus frases más polémicas:

Un hombre que nace en un mundo ya ocupado, si sus padres no pueden alimentarlo y si la sociedad no necesita su trabajo, no tiene ningún derecho a reclamar ni la más pequeña porción de alimento –de hecho, ese hombre sobra. En el gran banquete de la Naturaleza no se le ha reservado ningún cubierto. La Naturaleza le ordena irse y no tarda mucho en cumplir su amenaza.

Tal preocupación puede comprenderse observando la evolución de la población mundial, desde el neolítico, a la explosión demográfica de la Revolución Industrial, como se evidencia en la Figura 2.4.

Población mundial, 10 000 BCE, 2010 CE

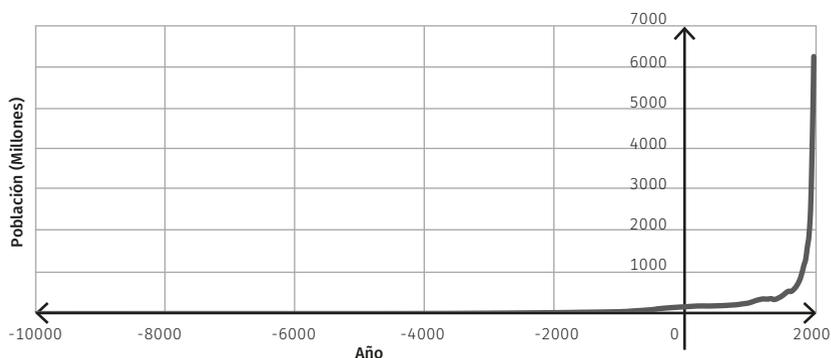


FIGURA 2.4. CURVA DE CRECIMIENTO DE LA POBLACIÓN MUNDIAL

Fuente: elaboración propia

Más adelante, y a solicitud del Club de Roma –un grupo de científicos y políticos preocupados por el crecimiento poblacional–, el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) realizó un informe llamado *Los límites del crecimiento* (Meadows, 1976). Para ello, se establecieron como variables de estudio la población y su crecimiento, la producción industrial y de alimentos, la contaminación y la disponibilidad de recursos naturales; se diseñaron fórmulas que las relacionaban, se realizó la carga de datos en un sistema modelado, y se simularon y graficaron situaciones a futuro.

En *Los límites del crecimiento* se evidencia la estrecha vinculación entre los indicadores de crecimiento económico y los de degradación socioambiental. El trabajo demostraba los impactos negativos ejercidos por el modelo de desarrollo de los países industrializados sobre el medioambiente planetario. La tesis principal del informe es que, en un planeta con límites, el crecimiento demográfico y el crecimiento económico crecientes no son sostenibles, no son posibles extrapolados en el tiempo (Leavy y Scrinzi:45).

Los límites que pone el planeta son los recursos naturales no renovables, la cantidad de suelo cultivable y la capacidad de los ecosistemas de absorber la contaminación y los residuos producto de las actividades humanas, entre otros (Durán:38; Eschenhagen:114).

En las conclusiones del informe, expresaron:

Si se mantienen las tendencias actuales de crecimiento de la población mundial e industrialización, este planeta alcanzará los límites de su crecimiento en el curso de los próximos 100 años. El resultado más probable sería un súbito e incontrolable descenso, tanto de la población como de la capacidad industrial.

A pesar de modificar los valores de las variables y realizar diferentes simulaciones, el colapso del sistema solo sufría variaciones de pocos años en su ocurrencia (Leavy y Scrinzi:39). Frente a ello, concluyeron que la única manera de evitar una situación catastrófica era poner límites al crecimiento poblacional, límites a la producción, a la generación de residuos y a la contaminación, es decir, límites a un medio finito, de allí el nombre del informe. En sus palabras: «no puede haber un crecimiento poblacional, económico e industrial ilimitado en un planeta de recursos limitados».

Propusieron entonces control de la natalidad, especialmente en los países en vías de desarrollo, y ya sea limitaciones al crecimiento económico o decrecimiento económico para evitar el colapso.

Por la misma época, el escritor Isaac Asimov escribía las siguientes palabras, en su libro *Introducción a la ciencia*:

Si la población terrestre continúa duplicando su número cada treinta y cinco años (como lo está haciendo ahora) cuando llegue el año 2600 se habrá multiplicado por 100 000 (...); ¡La población alcanzará los 630 000 000 000! Nuestro planeta solo nos ofrecerá espacio para mantenernos de pie, pues se dispondrá únicamente de 3 cm² por persona en la superficie sólida, incluyendo Groenlandia y la Antártida. Es más, si la especie humana continúa multiplicándose al mismo ritmo, en el 3550 la masa total de tejido humano será igual a la masa de la Tierra.

Si hay quienes ven un escape en la emigración a otros planetas, tendrán materia suficiente para alimentar esos pensamientos con el siguiente hecho: suponiendo que hubiera 1 000 000 000 000 de planetas habitables en el Universo

y se pudiera transportar gente a cualquiera de ellos cuando se estimara conveniente, teniendo presente el actual ritmo de crecimiento cuantitativo, cada uno de esos planetas quedaría abarrotado literalmente y solo ofrecería espacio para estar de pie allá por el año 5000. ¡En el 7000 la masa humana sería igual a la masa de todo el Universo conocido!

Evidentemente, la raza humana no puede crecer durante mucho tiempo al ritmo actual, prescindiendo de cuanto se haga respecto al suministro de alimentos, agua, minerales y energía. Y conste que no digo «no querrá», «no se atreverá» o «no deberá»: digo lisa y llanamente «no puede». (Asimov, 1972).

En respuesta al Informe del MIT surge otro modelo propuesto por la Fundación Bariloche: el Modelo Mundial Latinoamericano o MML (Herrera, 1976).

La Fundación Bariloche es una institución académica privada de bien público, sin fines de lucro, formada por científicos argentinos. El modelo propuesto, a diferencia del modelo del MIT, no buscaba predecir tendencias a nivel global, no pretendía establecer la fecha de un colapso, porque partieron de la idea de que el mundo ya estaba en crisis (Herrera:11; Leavy y Scrinzi:40). El Dr. Gilberto Gallopín, Ph.D en Ecología e integrante de la Fundación Bariloche, en una entrevista realizada en su visita a la Universidad Nacional del Litoral, expresó (Gallopín, 2016):

Mientras otros modelos globales se concentraron en la crisis en el futuro, la mayoría de la población ya vivía en la pobreza y la miseria. Ignorar esto equivalía a aceptar el *status quo* y los valores centrales de la sociedad vigente y subordinar la necesidad de cambio a evitar una catástrofe futura que llevara la crisis al Norte. En este contexto, las políticas orientadas al equilibrio global como las de los *Límites al Crecimiento* tenderían a asegurar que las injusticias actuales del sistema global se mantuvieran.

Y agregó:

Con el MML no negábamos la posibilidad de límites físicos, ni postulábamos un crecimiento material económico indefinido. Nuestro argumento era que en el horizonte de tiempo considerado y a las escalas globales o regionales, los límites operacionales a la humanidad eran sociopolíticos y no físicos.

Es decir, asumieron que el deterioro del medioambiente y la escasez de recursos se debían al sistema productivo prevaleciente y al sobreconsumo de los países desarrollados a costa de los países en vías de desarrollo; y que el problema no radicaba en la escasez de los recursos naturales, sino en la

forma en los cuales se explotan y distribuyen (Goñi y Goin:195; Herrera, 2004: 123-125; Leavy y Scrinzi:42).

Su meta era planificar la satisfacción de necesidades básicas de toda la población mundial, modificando patrones de pensamiento y comportamiento, para un futuro más equitativo y sustentable.

Su propuesta apuntaba a lograr una sociedad deseable, con sus necesidades de nutrición, vivienda, educación y salud satisfechas, logrado a través de cambios institucionales y del sistema de valores, haciendo hincapié en la participación ciudadana en la toma de decisiones.

La introducción del concepto de necesidades básicas como parámetro para planificaciones a largo plazo fue un punto innovador del MML, así como la elección de la esperanza de vida al nacer como indicador, en lugar del indicador económico PBI (Producto Bruto Interno).

Este modelo, nacido en nuestro país como respuesta a un modelo propuesto por los países del Norte, tuvo repercusión mundial y generó debates en torno a las soluciones a aplicar, pero no contó con el apoyo de la comunidad científica internacional (Goñi y Goin:196). Lo cierto es que las alternativas viables son diferentes para distintos países, así como son diferentes sus entornos medioambientales, sus recursos, sus sociedades y valores culturales, sus posibilidades económicas o, en definitiva, sus objetivos a mediano y largo plazo (Leavy y Scrinzi:45).

En un mundo globalizado, la actividad industrial y la explotación de los recursos naturales sobrepasan las fronteras de los países, como es el caso de la contaminación del aire, el calentamiento global y la disminución de la capa de ozono, por citar algunos ejemplos. Esta situación se agrava aún más cuando los países desarrollados explotan los recursos naturales y/o envían los residuos generados por su propia actividad industrial a los países en vías de desarrollo. A pesar de la complejidad expuesta, no hay dudas de que estas circunstancias aumentan las situaciones de inequidad, y atentan contra un futuro sustentable.

5. ENFOQUE SISTÉMICO DEL AMBIENTE

El desarrollo de las ciencias ha sido ampliamente influenciado por el estudio específico y aislado ya sea de una especie biológica, de las propiedades de un grupo de sustancias químicas, o de la naturaleza de un fenómeno físico. Si bien se considera de importancia por su aporte al conocimiento, este enfoque, conocido como *enfoque analítico*, no es suficiente, no es válido cuando existen muchas variables en juego, o cuando las relaciones entre las mismas no son claramente definidas. En este caso, no es útil la suma de los estudios que se realicen sobre cada parte componente del todo, porque además, una alteración en un componente dado se propaga por las relaciones que unen a dichos componentes. Este es el caso de las problemáticas ambientales, donde resulta imprescindible evaluar en conjunto todas las variables, sus interrelaciones e interdependencias (Furtado, Belt, Jammi:23–24; García:1).

La complejidad de las problemáticas ambientales necesita entonces de otro tipo de acercamiento a su estudio para lograr su comprensión en la búsqueda de soluciones, y que además las mismas provengan de diferentes disciplinas y permitan tomar las decisiones político-económicas necesarias para lograr soluciones apropiadas (Durán:10; García:3; Galano et ál.:6).

El *enfoque sistémico* se origina en la Teoría de sistemas, entendiendo como sistema a un conjunto de subsistemas que vinculados le dan características propias al sistema, que no las tendría si se evaluaran sus partes individuales.

Llevado al caso de los problemas ambientales, se asume que una modificación en un subsistema alterará la dinámica de los otros subsistemas, y por ende, del sistema en sí. La naturaleza es en sí misma compleja y dinámica, y la aplicación de un enfoque sistémico se presta especialmente para su comprensión (Durán:36; Eschenhagen:112). La desaparición de una especie biológica, por ejemplo, alterará la cadena trófica del ecosistema en cuestión, pudiendo aparecer una plaga por reproducción; y si a ello se le suma una intervención humana, la situación se desequilibra aún más. Tansley define un ecosistema como «un sistema definible o limitado de interrelaciones físicas y biológicas dinámicas y complejas que varían enormemente de tamaño y de complejidad, de lo diminuto o simple a lo grande y complejo» (Tansley, 1935).

La aplicación de un enfoque sistémico a la complejidad ambiental (y la búsqueda de soluciones interdisciplinarias) comenzó en la década del 50, y tuvo su auge años después, ante la exigencia de nuevas aproximaciones a la misma.

El *ambiente*, definido como sistema complejo, es una red de vínculos conformados entre elementos físicos, químicos, biológicos, sociales, políticos y económicos, y se diferencia del concepto de *medioambiente* por la pertenencia o incorporación del ser humano al mismo, es decir que no involucra únicamente un aspecto espacial –el entorno– sino también una escala temporal, al tener en cuenta el uso que hace la humanidad de dicho

espacio (Durán:36). En la Figura 2.5 se muestra una representación gráfica sencilla del sistema ambiental, que se sugiere comparar con la Figura 2.1, al inicio de este capítulo.

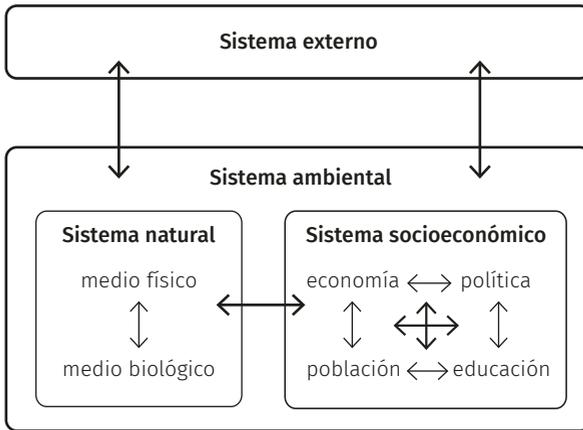


FIGURA 2.5. EL AMBIENTE COMO SISTEMA
Fuente: elaboración propia

En los años 70 la crisis ambiental estaba presente en la agenda internacional, y en la Conferencia de Estocolmo, realizada en 1972, se reconocía la degradación del entorno natural como resultado de la actividad industrial. Al mismo tiempo, se evidencian las consecuencias de un modelo que asigna importancia únicamente al aspecto económico por sobre todos los demás, consecuencias que sufre la sociedad y el medioambiente (Guimaraes:56).

La búsqueda de soluciones a las problemáticas ambientales requiere de un pensamiento complejo y de la aplicación de un enfoque sistémico; pero además, y fundamentalmente, esta búsqueda demandará acciones socioculturales, cambios en la participación ciudadana, en los métodos y procesos de producción, en los estilos de vida y el consumo (García:2).

6. DESARROLLO SUSTENTABLE

En 1987 la Comisión Mundial para el Medio ambiente y Desarrollo humano aprobó por unanimidad un documento denominado *Nuestro Futuro Común*, también conocido como *Informe Brundtland*, en honor a Gro Harlem Brundtland, primera mujer en ser Primer Ministro de Noruega y por encabezar la comisión que elaboró el documento mencionado (Comisión Brundtland, 1988). En el mismo, se definió por primera vez el término *Desarrollo sustentable* (ds).

El Informe Brundtland analiza y critica el modelo de crecimiento puramente económico, y plantea los altos costos sociales y medioambientales que ello acarrea (Comisión Brundtland, 1988). Sostiene que es necesario aceptar la interrelación entre economía, medioambiente y sociedad, y por ello considera a la pobreza como causa y consecuencia sobre el entorno natural, y exhorta a dar atención prioritaria a las necesidades básicas de las poblaciones de menores recursos (Leavy y Scrinzi:37–38; Galano et ál.:3).

El concepto de desarrollo sostenible implica límites —no límites absolutos, sino limitaciones que imponen a los recursos del medio ambiente el estado actual de la tecnología y de la organización social y la capacidad de la biosfera de absorber los efectos de las actividades humanas—, pero tanto la tecnología como la organización social pueden ser ordenadas y mejoradas de manera que abran el camino a una nueva era de crecimiento económico.

Asimismo, resalta la importancia de buscar soluciones políticas consensuadas internacionalmente para solucionar los problemas ambientales (Durán:39).

El DS se define como aquel desarrollo que permite «satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades» (Comisión Brundtland:59).

A partir del momento de su definición, el concepto de DS, o sostenible —en este texto se usarán indistintamente— ha generado debates conceptuales debido a ciertas ambigüedades en los términos utilizados.

Sin profundizar dicho debate, del cual se encuentra disponible amplia bibliografía, surge rápidamente la necesidad de identificar para una sociedad en particular cuáles son y cuáles serán dichas necesidades. Para la sociedad argentina, probablemente sean prioritarias las necesidades básicas de vivienda, alimento, educación y salud, así como la erradicación de la pobreza.

Un concepto importante, implícito en la definición, es el de equidad (Comisión Brundtland:23; Furtado et ál.:9–11). Por un lado, implica apuntar a un nivel de vida equitativo dentro de la misma generación, y por otro, reducir la contaminación y la generación de residuos actual, así como la explotación de los recursos naturales, de modo que las futuras generaciones tengan acceso a los mismos recursos con los que contamos actualmente, una transferencia de capital natural, un equivalente nivel de bienestar (Gaviño:6; Lozano:1840). Para nuestro país, ello implicaría planificar acciones en el corto plazo, destinadas a mitigar la pobreza, y a largo plazo, a revertir las causas y consecuencias de la presente desigualdad social (Goñi y Goñi:193–194).

Otras definiciones de DS hacen énfasis en el manejo adecuado de los recursos naturales y la aplicación de tecnologías apropiadas (como la propuesta por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, o FAO), y en la preservación del capital natural, atendiendo a los ciclos biogeoquímicos de recuperación natural, la fertilidad de los suelos y la capacidad de carga del planeta, definida esta como la carga máxima que

la humanidad puede imponer de modo sostenible al medioambiente antes de que este sea incapaz de sostener y alimentar la actividad humana, para lograr un DS.

La tecnología adecuada (TA), también conocida como tecnología apropiada o intermedia, es aquella tecnología que está diseñada con especial atención a los aspectos medioambientales, éticos, culturales, sociales y económicos de la comunidad a la que se dirigen. Ejemplos de tecnología apropiada son los desarrollos del INTI destinados a la agricultura familiar: máquinas y herramientas de laboreo de bajo costo, sencillas de fabricar y reparar, durables; o equipos para el aprovechamiento de energías renovables como calefones o cocinas solares, en aquellas comunidades que no cuentan con servicio eléctrico.

El DS tiene como principal objetivo mejorar la calidad de vida de la población, e implica necesariamente un equilibrio dinámico entre los aspectos involucrados para lograrlo, ya que *calidad de vida* no posee el mismo significado para una persona, una sociedad urbana o una rural, para un país rico o uno pobre (Calvente:4; Gaviño:10; Lozano:1840). En definitiva, el término calidad de vida se refiere a las condiciones ecológicas o medioambientales, y sociales que caracterizan a un espacio ocupado por el ser humano, donde este y la sociedad a la cual pertenece poseen sus necesidades básicas satisfechas. Es por ello que la efectividad de las acciones que se implementen, no puede medirse con indicadores de tipo económico, como el PBI, sino en unidades de progreso social (Rocuts, Jiménez Herrero, Navarrete:8–9).

7. DIMENSIONES DE LA SUSTENTABILIDAD

A diferencia del modelo de crecimiento económico, el DS tiene en cuenta tres aspectos: social, económico y medioambiental o ecológico (Calvente:2). La sustentabilidad se logra cuando todos ellos se encuentran en equilibrio dinámico (Rocuts et ál.:10; Lozano:1839).

La sustentabilidad ecológica o medioambiental se logra realizando un manejo adecuado de los recursos naturales, imprescindibles para la vida en un ambiente sano, y para la seguridad alimentaria y energética. También, cuando se permite la recuperación y/o mantenimiento de los ciclos naturales, y no se supera la capacidad de carga de los ecosistemas, es decir la magnitud de la naturaleza para absorber y recuperarse de la intervención del ser humano (Calvente:3; Durán:41–42).

El desafío de lograr la sustentabilidad en la práctica apunta a tener en cuenta el aspecto medioambiental en las decisiones políticas y planificaciones

institucionales a largo plazo, pues no puede existir actividad económica sin un medioambiente proveedor de materias primas, y no es posible la vida sin un entorno sano (Durán:17; Guimaraes:62).

Teniendo en cuenta una población mundial creciente, y la necesidad de alimento de la misma, cada país deberá realizar una valoración de sus propios recursos naturales. Nuestro país posee riquezas: agua, suelos fértiles, minerales, recursos que son escasos en otros países, de allí la importancia de realizar un buen uso y manejo de los mismos.

La sustentabilidad social se logra cuando los miembros de una comunidad poseen sus necesidades básicas satisfechas, tienen acceso a un trabajo digno y viven en un medioambiente no contaminado. La sustentabilidad social apunta a erradicar la pobreza y las desigualdades sociales, a una comunidad unida y con valores culturales propios que la identifican y le dan cohesión, una comunidad educada y participativa en la toma de decisiones, una comunidad que decide hacia dónde quiere crecer (Durán:43).

Cada sociedad deberá valorar a aquellos actores sociales que trabajan para lograr la sustentabilidad (Guimaraes:69). Un ejemplo de actores sociales son los recuperadores urbanos y promotores ambientales, que realizan una tarea que colabora con la sustentabilidad económica y con la sustentabilidad medioambiental al dar valor a los residuos, fomentar el reciclado y generar conciencia (Durán:44).

Por último, la sustentabilidad económica se logra cuando se admite el justo valor tanto de los recursos naturales, la necesaria materia prima que permite la producción, como el valor del trabajo, que debe ser equitativamente remunerado (Durán:46).

Las empresas, el sector productivo, tienen una responsabilidad en el desarrollo eficiente de su actividad, en la utilización de energías limpias y tecnologías apropiadas, y deben tener en cuenta una valoración de impactos y de los costos ambientales.

La Figura 2.6 representa gráficamente los tres aspectos, también llamados esferas o dimensiones de la sustentabilidad, así como sus intersecciones o solapamientos.

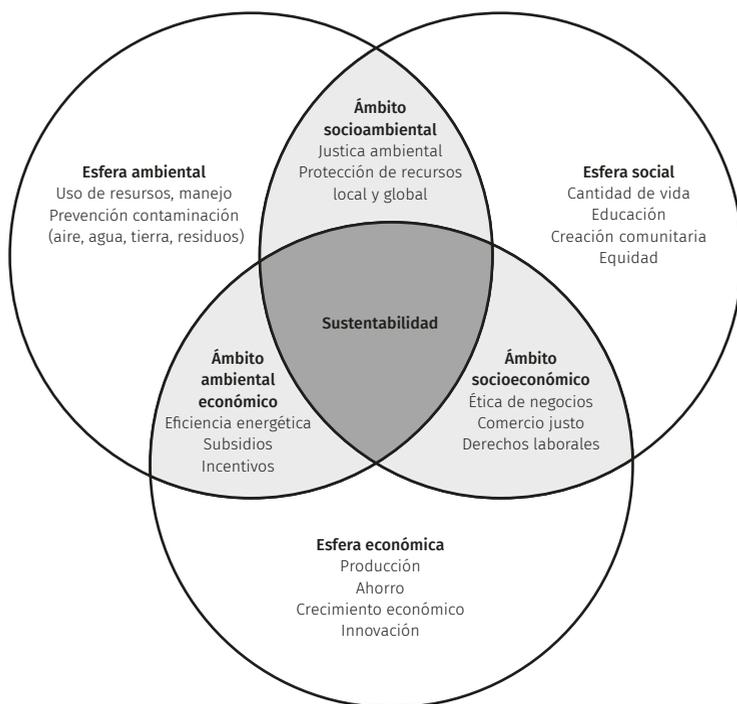


FIGURA 2.6. DIMENSIONES DE LA SUSTENTABILIDAD

Fuente: elaboración propia

Para definir adecuadamente la sustentabilidad, es necesario considerar todas sus dimensiones de manera articulada, atendiendo a sus intersecciones, pues al ser un sistema, sus relaciones adquieren relevancia (Calvente:4; García:1; Gaviño:3; Guimaraes:66; Lozano:1839). El análisis de las relaciones e intersecciones de las dimensiones de la sustentabilidad, es lo que nos permitirá comprender mejor el funcionamiento de un sistema ambiental complejo y tomar decisiones apuntando a un ds a largo plazo (Furtado et ál.:1).

Del cruce entre lo social y lo medioambiental resulta un espacio que debe reunir las condiciones para que sea habitable. La sociedad debe influir positivamente sobre el entorno que le permite la vida, a través de la educación para la sustentabilidad, del cumplimiento de normas ambientales, y de la protección de los recursos y el mantenimiento del capital natural; mientras que el medioambiente influye sobre la sociedad que lo habita, brindando alimentos y espacios verdes de esparcimiento.

Del cruce entre lo social y lo económico resulta una actividad productiva que debe ser equitativamente remunerada, implica trabajo digno y ética en los negocios, puesto que la sociedad aporta al desarrollo con su trabajo, y la economía es generadora de empleo. A la sociedad le compete controlar los procesos productivos apuntando a la prevención de la contaminación.

Finalmente, del cruce entre lo económico y lo medioambiental surge que la actividad productiva debe ser viable, posible; procesos productivos con buenas prácticas medioambientales que respeten los ciclos naturales y valoren los recursos, imprescindibles para el desarrollo de la economía. Es hora de aceptar que la economía no se limita a la producción de riqueza, y la ecología a la protección de la naturaleza, y buscar la compatibilidad entre ambas disciplinas, unidas por el prefijo *eco*.

La Figura 2.7 grafica estas relaciones.

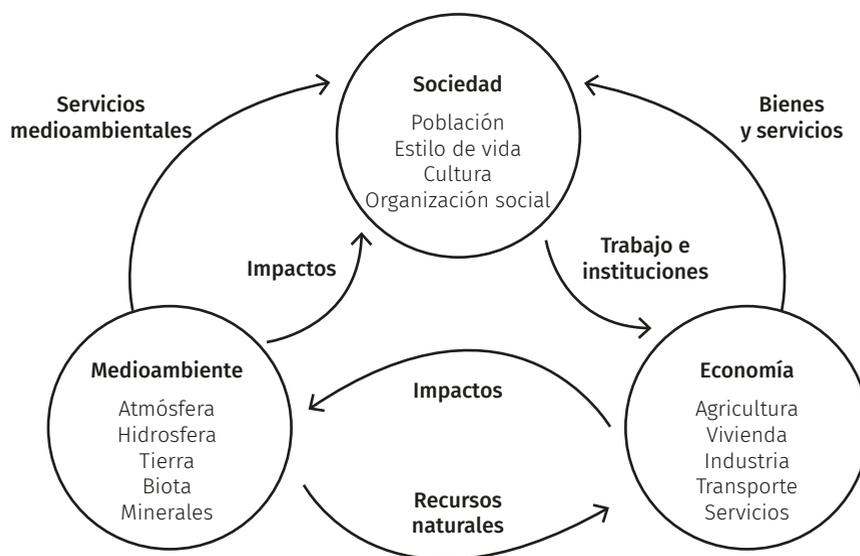


FIGURA 2.7. INTERRELACIONES ENTRE LAS DIMENSIONES DE LA SUSTENTABILIDAD
Fuente: elaboración propia, adaptado de Calvente, 2007

Si consideramos inicialmente a las dimensiones de la sustentabilidad como esferas aisladas, estáticas, sus interrelaciones irán construyendo el proceso de la sustentabilidad en forma articulada y dinámica.

Asimismo, actualmente se incorpora al modelo una cuarta dimensión o esfera, donde las dimensiones cultural, educativa y política–institucional son las más frecuentes (Rocuts et ál.:6; Lozano:1841–1842).

En el caso de la dimensión educativa de la sustentabilidad, la incorporación de esta como una esfera relevante por sí misma, se fundamenta en que a través de la educación puede lograrse mejorar la conciencia ambiental, cambios en los hábitos de consumo, y participación y compromiso de la sociedad. En este sentido, es fundamental el cambio de paradigma desde la educación ambiental a la educación para la sustentabilidad.

La educación para la sustentabilidad está basada en valores, apunta a desarrollar el pensamiento crítico y la participación, es transversal y

multidisciplinaria y se nutre de diferentes herramientas pedagógicas para lograrlo, como el trabajo en talleres de discusión, juego de roles, etc., donde se aplica el aprender analizando, aprender discutiendo y aprender haciendo (Galano et ál.:7; Martínez Huerta:2-4; Anzolín:314). Se diferencia de la educación ambiental en que está orientada a la acción, más que a la concientización, puesto que no se trata de *aprender más cosas*, sino de *pensar de otra manera*.

La inclusión de la dimensión político-institucional como cuarta esfera se fundamenta en que las decisiones políticas, la participación de organizaciones sociales y comunitarias, la planificación a nivel de gobierno, la promulgación de leyes y normativas y las tareas de control que realice el Estado, irremediamente modificarán el proceso dinámico hacia el ds de una sociedad (Durán: 17; Guimaraes:58, 69-70; Rocuts et ál.:16).

Los acuerdos que se logren entre los diferentes sectores político-institucionales serán fundamentales para apuntar a una sustentabilidad de esta cuarta esfera.

CONCLUSIONES

Resumiendo, el ds propone una alternativa al modelo de crecimiento puramente económico, apostando a mejorar la calidad de vida de una población, en un proceso dinámico, articulado y planificado a largo plazo (Goñi y Goin:194). No busca frenar la economía sino fomentar un desarrollo desde una óptica diferente. Reconoce la complejidad de las relaciones entre sociedad, economía y ecología, por lo que aplica un enfoque sistémico e interdisciplinario para su análisis y comprensión (Calvente:3; García:17).

El ds implica un proceso de cambio social armónico que involucra la explotación controlada de los recursos naturales, las inversiones a largo plazo, el desarrollo de la ciencia y la tecnología de un país y las reformas de las instituciones.

La tarea no es sencilla, pero ¿acaso nos queda otra alternativa? Ya existen aportes interesantes y exitosos que adoptan el modelo de la naturaleza, donde todo es cíclico, donde todo se recicla y no se generan residuos, donde el círculo se cierra, para aplicarlo a la economía (economía circular), a la industria (producción más limpia), etcétera (Anzolín:301).

El análisis efectuado en este capítulo está dedicado a sistemas ambientales globales o generales. En los capítulos posteriores, se aplica el concepto de la sustentabilidad relacionado con la Química y la Ingeniería.

Referencias bibliográficas

- ANZOLÍN, A.** (2006). *Lazos verdes. Nuestra relación con la naturaleza* (pról. Guillermo Priotto). Buenos Aires, Argentina: Maipue.
- ARÍSTIDES, S.; MATA DE GROSSI, M.** (2005). *La llamada Revolución Industrial*. Caracas: Universidad Católica Andrés Bello.
- ASIMOV, I.** (1972). *Guide to Science*. Penguin: Basic Books
- CALVENTE, A.** (2007). El concepto moderno de sustentabilidad. UAIS Sustentabilidad. Recuperado de <http://www.sustentabilidad.uai.edu.ar/pdf/sde/uais-sds-100-002%20-%20sustentabilidad.pdf>
- COMISIÓN BRUNDTLAND** (1988). *Nuestro Futuro Común*. Madrid: Alianza.
- DURÁN, D.** (2016). *Proyectos ambientales y sustentabilidad*. Buenos Aires: Lugar Editorial SA.
- ESCHENHAGEN, M.** (2010). Los límites de la retórica verde o ¿por qué después de 30 años de esfuerzos no se observan mejoras ambientales sustanciales? *Gestión y Ambiente*, 13(1), 111–118.
- FURTADO, J.; BELT, T.; JAMMI, R.** (2000). *Economic Development and Environmental Sustainability*. Washington D.C.: WBI Learning resources series.
- GALANO, C. ET AL.** (2002). *Manifiesto por la vida. Por una ética para la sustentabilidad*. Simposio sobre Ética y Desarrollo Sustentable. Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=31713416012> o <http://www.scielo.br/pdf/asoc/n10/16893.pdf>
- GALLOPÍN, G.** (2016). Ciclo de debates: hacia un desarrollo sustentable. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL. Recuperado de https://www.unl.edu.ar/noticias/news/view/eL_modelo_mundial_latinoamericano_cuatro_d%C3%A9cadas_despu%C3%A9s_1
- GARCÍA, R.** (1994). Interdisciplinariedad y sistemas complejos. *ReImeCS*, 1(1). Recuperado de <http://www.pensamientocomplejo.com.ar/docs/files/Garcia,%20Rolando%20-%20Interdisciplinariedad%20y%20Sistemas%20Complejos.pdf>
- GAVIÑO, M.** (2002). *La Gestión Ambiental y la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Marco conceptual*. Asunción: Global Water Partnership. Alter vida.
- GOÑI, R.; GOIN, F.** (2006). Marco conceptual para la Definición del Desarrollo Sustentable. *Salud colectiva*, 2(2), 191–198
- GUIMARAES, R.** (1998). La ética de la sustentabilidad y la formulación de políticas de desarrollo. *Ambiente & Sociedade* (2), 5–24.
- HERRERA, A.** (1976). *Catástrofe o nueva sociedad: Modelo Mundial Latinoamericano*. Presentado en la VIII Reunión de la Asamblea General del Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales CLACSO. Quito, Ecuador. Recuperado de http://nuso.org/media/articles/downloads/210_1.pdf o <http://nuso.org/articulo/modelo-mundial-latinoamericano/>

- LEAVY, S.; SCRINZI, L.** (2016). Sustentabilidad global: Comentarios de dos Modelos de desarrollo en 1970, 2000 y 2015. *Ciencias Agronómicas. Revista xxvii Año 16*, 037–046.
- LOZANO, R.** (2008). Envisioning sustainability three-dimensionally. *Journal of Cleaner Production*, 16(17), 1838–1846.
- MARTÍNEZ HUERTA, J.** (s.f.). Educación para la sostenibilidad. Centro de Educación e Investigación Didáctico ambiental Ungurugela. Unesco Etxea. Recuperado de http://www.unescoetxea.org/ext/manual_EDS/pdf/01_educacion_castellano.pdf
- MEADOWS, D. H. ET AL.** (1972). *The limits to growth*. New York: Pontomac Associates.
- ROCUTS, A.; JIMÉNEZ HERRERO, L.; NAVARRETE, M.** (2009). Interpretaciones visuales de la sostenibilidad: Enfoques comparados y presentación de un Modelo Integral para la toma de decisiones. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Desarrollo y Humanismo* (4), 1–22.
- TANSLEY, A.** (1935). The Use and Abuse of Vegetational Concepts and Terms. *Ecology*, 16(3), 284–307.

Sitios de interés

- FUNDACIÓN BARILOCHE. ARGENTINA.** <http://fundacionbariloche.org.ar/>
- UNESCO** (2002). Teaching and Learning for a Sustainable Future. <http://www.unesco.org/education/tlsf/>

Bibliografía

- LILIENFELD, R.** (1984). Teoría de sistemas: Orígenes y aplicaciones en Ciencias Sociales. México, D.F.: Editorial Trillas.
- MALTHUS, T.** (1826). An essay on the principle of Population. London: John Murray.
- REBORATTI, C.** (2000). Ambiente y Sociedad. Conceptos y relaciones. Buenos Aires: Ariel.
- SLADE, G.** (2007). Made to break: Technology and Obsolescence in America. Cambridge, London: First Harvard University Press paperback edition.

3 Química verde. 12 principios

1. INTRODUCCIÓN. SURGIMIENTO DE LA QUÍMICA VERDE

La situación de crisis ambiental planteada en los capítulos anteriores dio paso a numerosas estrategias para hacer frente a la misma. Una de ellas fue la promulgación en 1990 en EE. UU. de la ley de Prevención de la Contaminación. En esta ley se define la prevención de la contaminación como la reducción en la fuente, en el origen, e incluye también otras prácticas que reduzcan o eliminen la creación de contaminantes, ya sea a través de una mayor eficiencia en el uso de materias primas, energía, agua u otros recursos, o con la protección/conservación de los recursos naturales. Su principal importancia está dada por el traslado del habitual enfoque del problema de la contaminación —el control y tratamiento— a un enfoque preventivo, evitando así la generación de contaminación (Yarto, Gavilán, Martínez:36; García Calvo–Flores, Dobado:206; Meléndez Pizarro, Camacho Dávila:2; Anastas, Warner, 1998:6–7).

Un joven ingeniero químico, Paul Anastas, trabajaba en esa época en la Agencia de Protección Medioambiental de EE. UU., EPA por sus siglas en inglés, la cual depende directamente del presidente, buscando soluciones que les permitieran a las industrias una reconversión o modificación de sus procesos apuntando a una producción más limpia, menos contaminante.

Paul Anastas, padre de la Química verde (en adelante qv), la definió en 1993 como «el diseño, desarrollo e implementación de productos y procesos que reducen o eliminan el uso y generación de sustancias peligrosas para la salud humana o el medio ambiente». Su idea era evitar los problemas antes de que ocurran para no tener que buscarles una solución.

En los siguientes años, se estableció el Certamen Presidencial sobre Química verde (*Presidential Green Chemistry Challenge Award*, en su idioma original), que tiene como meta el reconocimiento de logros sobresalientes en qv a través de un programa anual de premios, que expone los beneficios científicos, ambientales y económicos que ofrecen las tecnologías de qv (García Calvo–Flores, Dobado:206). El mismo representa una oportunidad para que individuos, grupos y organizaciones industriales y científicas compitan anualmente por premios en reconocimiento de la innovación en la práctica de una química más limpia, económica e inteligente. Aún hoy se

premia anualmente a cinco empresas o expertos con una destacada labor en defensa del cumplimiento de dichos principios.

Asimismo, se crearon organismos, como el *Green Chemistry Institute*, con la misión de promover la qv mediante el acercamiento de la industria y el gobierno con universidades y laboratorios nacionales para desarrollar tecnologías limpias de producción sustentable. En el año 2001 el Instituto se incorporó a la *American Chemical Society*, máxima organización de la comunidad científica a nivel mundial, que apoya la investigación en el campo de la química con el fin de aumentar el papel de la sociedad para abordar temas ambientales (Sierra, Meléndez, Ramírez–Monroy, Arroyo:7).

A nivel industrial, hubo alguna resistencia respecto de la factibilidad de lograr mejoras en los procesos, y llevó su tiempo comprender la implicancia de esta innovadora propuesta, así como diferenciar el término *verde* de los movimientos políticos ecologistas (como si la ciencia o la educación no fueran políticas), para comprender que las ventajas económicas, sociales y medioambientales podían lograrse simultáneamente. Es más, hubo ciertos debates en torno a llamar a esta nueva disciplina como qv, o química sustentable, los cuales actualmente se consideran sinónimos. En cualquier caso, la ciencia es un medio de producción de conocimientos con una moralidad ética bien precisa, y los químicos tenemos una responsabilidad que cumplir, más allá de los nombres (Spanevello, Suárez, Sarotti: 124; Anastas, Warner,1998:12). La consolidación de la qv como disciplina científica —así como campañas de concientización llevadas a cabo por Anastas y sus colaboradores— favoreció el logro de los objetivos propuestos.

Desde EE. UU., la qv se propaga a las industrias y universidades, a las leyes y gobiernos de los países del mundo, en muchos casos con la creación de redes conformadas por actores de diferentes sectores para el intercambio de conocimientos y la generación de conciencia medioambiental (García Calvo–Flores, Dobado:208–209; Sierra et ál.:7; Vargas Afanador, Ruiz Pimiento:29; Anastas, Eghbali, 2010:301).

La Figura 3.1 grafica la secuencia histórica de los acontecimientos más relevantes relacionados con el surgimiento de la qv:

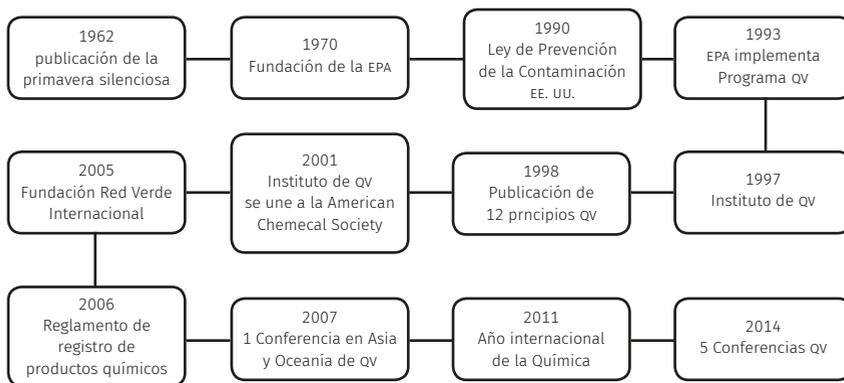


FIGURA 3.1. HITOS EN LA HISTORIA DE LA QUÍMICA VERDE

Fuente: elaboración propia

Los objetivos de la qv han sido definidos de manera más específica por Paul Anastas como el establecimiento de los principios para la síntesis y aplicación de productos y procesos químicos que reduzcan o eliminen completamente el uso y producción de materiales que sean dañinos al medioambiente (Anastas, Warner, 1998:6). Con estos objetivos, se va más allá de la química ambiental, y más todavía del campo de la ecología. Por primera vez se trasciende el campo de acción de una disciplina, ya que se tiene presente en forma constante tanto al ser humano como al medioambiente y se apuesta a una forma innovadora de hacer las cosas a largo plazo, incorporando el concepto de sustentabilidad. Es una nueva forma de encarar la química, el desarrollo, la investigación, la producción industrial y, en definitiva, el futuro del ser humano.

Actualmente, Paul Anastas se desempeña como profesor de qv y como director del Center of Green Chemistry & Green Engineering en la Universidad de Yale.

2. CARACTERÍSTICAS DE LA QUÍMICA VERDE

La implementación de la qv tiende a reducir y eliminar sustancias peligrosas para el medioambiente y la salud desde la industria química. Es decir que se focaliza en reducir el peligro intrínseco de las sustancias, atendiendo a todas las etapas en el ciclo de vida de la sustancia (procesos de producción y producto), su toxicidad, las materias primas y energía utilizadas en la producción, basada en las interrelaciones entre producción y sociedad,

o producción y medioambiente, etcétera (Yarto et ál.:38; Doria Serrano:413; Anastas, Eghbali, 2010:302).

Por ello decimos que la qv aplica un enfoque sistémico que abarca desde las materias primas, pasando por el proceso productivo, el uso del producto y la disposición final una vez finalizada la vida útil del mismo (Anastas, Eghbali, 2010:309).

Se reducen los riesgos para el ser humano y los ecosistemas, ya que, si las sustancias y los procesos químicos son diseñados de una manera inherentemente segura y benigna, serán necesarios menos controles para mitigar los riesgos.

Tiene carácter preventivo porque se hace hincapié en el diseño de los procesos, de las reacciones químicas, de las condiciones de reacción, así como en el análisis de la toxicidad para los seres vivos del producto generado. Por ello mismo, la qv se relaciona con otras disciplinas. Dado que tiene entre sus metas reducir residuos contaminantes, se relaciona con la Ecología, Ciencias ambientales y Toxicología. Y al aplicar sus principios en los procesos industriales, se relaciona también con la Ingeniería (Meléndez Pizarro, Camacho Dávila:3). El enfoque de la qv hacia la sustentabilidad lo vincula además con las Ciencias sociales, como la Comunicación, la Psicología ambiental, etc. Esto se representa en la Figura 3.2.

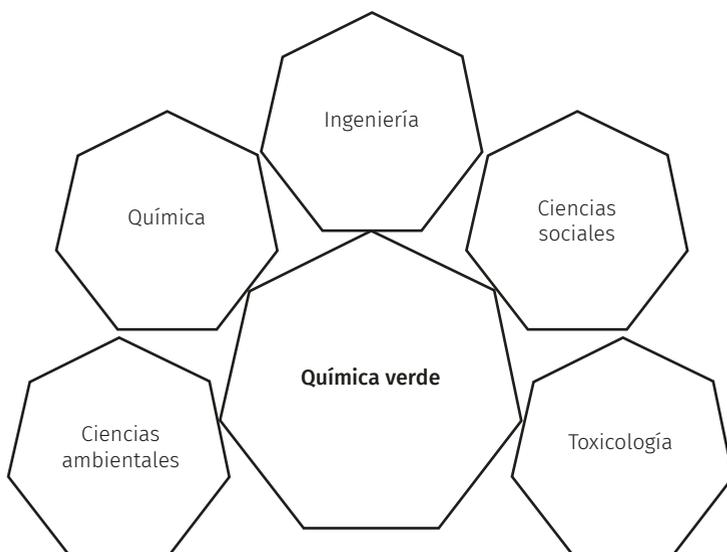


FIGURA 3.2. RELACIÓN DE LA QV CON OTRAS DISCIPLINAS

Fuente: elaboración propia

Apuesta a un modelo circular teniendo en cuenta cada etapa del ciclo de vida del producto, y a la economía circular, que simula, para los llamados nutrientes tecnológicos o creados por el hombre, a los ciclos naturales donde no se generan residuos.

Se enrola en el desarrollo sustentable, pues comparte el objetivo de mejorar la calidad de vida de las presentes y futuras generaciones, teniendo en cuenta los ámbitos relativos al mismo: medioambiente, economía y sociedad. Esta estrategia significa que una actividad productiva solo puede ser económicamente sustentable si se alcanza el respeto al medioambiente, el beneficio social y la ventaja competitiva en el mercado.

Si bien el principal campo de aplicación de la qv son los laboratorios de desarrollo de producto y las industrias químicas, otras industrias (farmacéutica, agroindustria, de alimentos, pinturas, automotriz, etc.) comenzaron a ver las ventajas de tener en cuenta la prevención en la generación de residuos y contaminación, tanto en los costos y como en la imagen de la empresa.

La mayoría de los defensores de la qv considera que la barrera fundamental que impide que esta se adopte de forma más extendida es la forma de pensar, que es un reflejo de la educación recibida por los químicos. Y es que si el objetivo es hacer química de una manera diferente, ello necesariamente implica pensar y aprender diferente.

En los laboratorios de química, ya sea a nivel de educación secundaria o más aún a nivel universitario, se generan residuos, se emiten gases a la atmósfera y corrientes líquidas residuales, se consume agua y energía. De allí la importancia de incorporar los contenidos de qv en forma transversal a diferentes asignaturas, con un enfoque basado más en la educación para la sustentabilidad que en la educación ambiental, de modo de predicar con el ejemplo, y formar futuros profesionales que ya cuenten con la práctica del pensamiento crítico, participativo y de actuar responsablemente.

Ya en el año 2000, Daryle Busch, anterior presidente de la Sociedad Americana de Química enunció: «La Química verde representa los pilares que mantendrán nuestro futuro sostenible. Es imprescindible enseñar el valor de la Química verde a los químicos del mañana».

3. 12 PRINCIPIOS DE QUÍMICA VERDE

En 1998, Anastas y Warner establecieron una serie de principios que sirvieran como guía de aplicación práctica. La Tabla 3.1 resume sus enunciados.

TABLA 3.1. 12 PRINCIPIOS DE QUÍMICA VERDE

12 Principios de Química verde	
Principio 1	Prevención, en lugar de tratamiento
Principio 2	Economía atómica
Principio 3	Síntesis de toxicidad reducida
Principio 4	Productos seguros
Principio 5	Reducción de sustancias auxiliares
Principio 6	Eficiencia energética
Principio 7	Materias primas y energías renovables
Principio 8	Reducción de derivados
Principio 9	Potenciación de la catálisis
Principio 10	Productos biodegradables
Principio 11	Monitoreo en tiempo real
Principio 12	Prevención de accidentes

3.1. Principio 1

Prevención: es mejor prevenir la generación de residuos que tratarlos después de haber sido creados

Muchos autores consideran que el primer principio de qv, conocido como el principio de prevención, es el más importante, y que los otros principios indican los caminos para lograrlo.

Como bien sabe cualquiera que haya derramado alguna vez al suelo el contenido de un recipiente de alimentos de la heladera, es mejor tratar de evitar el desastre que limpiarlo una vez hecho. Aplicando esto a la qv, esta regla básica significa que la prevención en la generación de desechos es mucho mejor que la estabilización de estos (Anastas, Warner, 1998:31). El fracaso en seguir esta regla simple ha sido el origen de la mayoría de los sitios contaminados con residuos peligrosos que hoy están causando infinidad de problemas a lo largo y ancho del mundo.

En el costo del producto que llega a nuestras manos se incluyen muchos costos asociados: el de las materias primas utilizadas, la tecnología incorporada, los reactivos químicos, etcétera (Yarto et ál.:39).

Hasta hace poco era más barato, en términos estrictamente monetarios, que los residuos (sólidos, líquidos o gaseosos) generados en un proceso productivo fueran eliminados al medioambiente. Sin embargo, los costos de tratamiento y disposición de los residuos involucrados en el proceso no han dejado de crecer cada vez más en los últimos años, hasta volverse muy significativos; y cuanto más peligrosos son estos residuos, más costoso es su tratamiento o su disposición final, y mayores son los riesgos a la salud del ser humano y de la contaminación del medioambiente (Yarto et ál.:39; Sierra et ál.:10; Anastas, Warner, 1998:30–31).

En el caso de un residuo peligroso, la infraestructura requerida para manejarlo, almacenarlo, tratarlo y darle una disposición final adecuada no será necesaria si el mismo no se genera. Por lo tanto, antes de llevar a cabo una transformación química, siempre se debe analizar si la ruta seleccionada es la más eficiente o la más segura, si esta genera la menor cantidad de residuos, o si existe alguna alternativa que sea mejor en este sentido.

Para cumplir con este principio, la QV propone reemplazar el concepto de rendimiento de una reacción química por el de la eficiencia del proceso.

Una medida de uso frecuente de los residuos es el factor E, que relaciona el peso de los residuos coproducido con el peso del producto deseado, donde en el primer término se engloban todos los productos utilizados (agua, disolventes orgánicos, materias primas, reactivos, coadyuvantes de proceso, etcétera) (González Barrios:9; Anastas, Eghbali, 2010:302).

$$\text{Factor E} = \frac{k \text{ residuos} + \text{sub prod}}{k \text{ prod deseado}}$$

En esencia el factor E es un valor teórico de la eficiencia de un proceso (Meléndez Pizarro, Camacho Dávila:4). En la Tabla 3.2 se muestran los índices de generación de residuos por kilogramo de producto final para algunas de las industrias químicas más representativas de la producción industrial (Doria Serrano:413).

TABLA 3.2. PRODUCCIÓN DE RESIDUOS EN DIFERENTES INDUSTRIAS

Sector industrial	Cantidad de producto (tn)	Factor E
Refinación de petróleo	106 – 108	< 0.1
Industria química	104 – 108	<1 – 5
Química fina	102 – 104	5 – 50
Industria farmacéutica	10 – 108	25 – 100

Como se deduce de la tabla anterior, algunas industrias generan más residuos que otras. La industria farmacéutica fue, a raíz de ello, una de las primeras en implementar los principios de QV, y de esta manera, logró mejoras sustantivas en sus procesos (González Barrios:10).

A nivel laboratorio, deberían implementarse técnicas como la microescala. La microescala es una técnica de laboratorio que utiliza material de vidrio pequeño, en muchos casos fabricado por los mismos estudiantes, así se reducen los volúmenes de sustancias químicas utilizadas en los experimentos, y se disminuyen, además, los residuos generados por tareas de docencia e investigación, los costos de la compra de drogas químicas y del posterior tratamiento de los residuos generados, y los riesgos de accidentes.

Si bien en algunos casos no puede aplicarse, y es necesario contar con el material a microescala, es una técnica que permite la experimentación basándose en la prevención, sin disminuir el rigor científico. Tiene además ventajas desde lo pedagógico, porque permite corroborar prácticamente los conceptos teóricos vertidos respecto a la prevención, por la motivación que implica la construcción de material, por la concentración que requiere trabajar a escala micro, etc. Son muchas las universidades y escuelas secundarias del mundo que han adoptado esta técnica, readaptando las convencionales, así como centros de capacitación, guías prácticas y manuales dedicados a la difusión y enseñanza del trabajo del químico en microescala (Yarto et ál.:41).

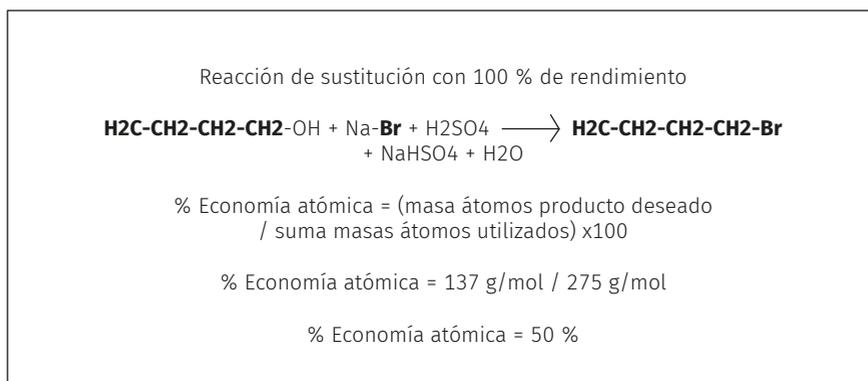
3.2. Principio 2

Economía atómica: los métodos de síntesis deberán diseñarse de manera de maximizar la incorporación de todos los materiales usados durante el proceso, en el producto final

Este principio propone el diseño de reacciones en las que la mayoría o todos los átomos con los que se empieza, terminan en el producto y no en un residuo. En este caso dicha reacción se denomina de alta economía atómica.

Al igual que en el principio de prevención, se evalúa el desarrollo de una reacción química por su eficiencia, en lugar de hacerlo por su rendimiento, el que habitualmente no tiene en cuenta el uso o la generación de productos indeseables, ya sea subproductos o residuos, que se generan en cualquier reacción de síntesis (Anastas, Warner, 1998:33). El cálculo del rendimiento se realiza atendiendo a la relación de moles de material inicial y moles de producto. Sin embargo, el peso molecular de estos residuos puede ser mucho mayor que el peso molecular del producto deseado.

Se muestra un ejemplo para una reacción de sustitución con un rendimiento del 100 %, mientras que la eficiencia atómica es del 50 %.



Un ejemplo de este principio a nivel industrial es el proceso mejorado, diseñado en 1991, para producir el analgésico ibuprofeno. En el proceso original, que constaba de seis pasos y que fue concebido en la década del 60, solo 40 % de los átomos reactivos formaba parte del producto (ibuprofeno) y 60 % terminaba en productos secundarios no deseados o residuos. El nuevo proceso consta de tres pasos, y 77 % de los átomos reactivos forman parte del ibuprofeno. Este proceso verde elimina cientos de miles de kilogramos al año, tanto de reactivos como de productos químicos secundarios al año (Pájaro Castro, Olivero Verbel:176).

3.3. Principio 3

Síntesis de toxicidad reducida: siempre que sea posible, los métodos de síntesis deberán diseñarse para utilizar y generar sustancias que tengan poca o ninguna toxicidad, tanto para el ser humano como para el medioambiente

Para la visión de la qv, la eliminación o al menos la minimización del riesgo es fundamental, y teniendo en cuenta el primer principio, es importante hacerlo desde el inicio, desde el origen; es decir, cuando una reacción química, un proceso, se planifica, se diseña (Anastas, Warner, 1998:35).

Cuando se expresa *siempre que sea posible* se refiere a que los químicos utilizan habitualmente sustancias tóxicas, porque algunas de ellas son las que favorecen cinética y termodinámicamente la obtención de un producto químico. Y hasta que se desarrollen nuevos reactivos químicos o nuevas rutas de síntesis, seguramente se seguirán utilizando, y el riesgo no será minimizado.

El riesgo puede definirse como la probabilidad de que ocurra un daño, ya sea al ser humano o al medioambiente, y depende de dos factores: del peligro y de la exposición.

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro} \times \text{Exposición}$$

Para reducir el riesgo existen dos caminos: minimizar la exposición o minimizar el peligro. Minimizar la exposición puede lograrse de varias formas: mediante el uso de elementos de protección personal como gafas, zapatos de seguridad, guantes, y también realizando monitoreo e instalando sistemas de control. Es el enfoque ambientalista tradicional.

La propuesta de la qv, en cambio, se enfoca en disminuir el peligro para bajar el riesgo, debido a que tanto los elementos de protección personal como el control y monitoreo implican aumentar los costos del proceso, pero fundamentalmente, porque los mismos pueden fallar, y en ese caso, como el proceso no es inherentemente seguro, las consecuencias pueden ser mayores al escaparse de control (Anastas, Warner, 1998:35). Un ejemplo de ello es el considerado como el mayor desastre de la industria química: el desastre de Bhopal (ver capítulo 1) (Anastas, Warner, 1998:54; Anastas, Eghbali, 2010:308).

Si se reemplaza una sustancia química por otra de menor toxicidad el peligro disminuirá, y por lo tanto el riesgo disminuirá.

3.4. Principio 4

Generar productos seguros, eficaces, pero no tóxicos: los productos químicos deberán ser diseñados de manera que mantengan la eficacia a la vez que reduzcan su toxicidad

Así como el principio 3 de la QV se refiere al proceso de obtención de un producto, a la síntesis, con este principio se está prestando atención a otra etapa del ciclo de vida del producto, esta es cuando el mismo está siendo utilizado.

El logro de este objetivo requiere la comprensión no solo de la química sino también de otras disciplinas como la Toxicología y Ciencias ambientales, en la evaluación de las consecuencias a largo plazo de las sustancias químicas sobre el ser humano y los ecosistemas, y en el estudio de la biología molecular para revelar los mecanismos de toxicidad; es decir, los mecanismos de acción de las sustancias en el cuerpo humano y en el medioambiente (Doria Serrano:414; Anastas, Warner, 1998:36; Anastas, Eghbali, 2010:304). La colaboración entre químicos y toxicólogos implica una innovación necesaria, ya que el riesgo es un defecto de diseño que debe ser abordado desde el comienzo del diseño molecular. Los profesionales tienen un reto y una responsabilidad en la realización de sus tareas (Yarto et ál.:38; García Calvo-Flores, Dobado:206).

Conociendo la estructura molecular los químicos pueden determinar las características de un producto (su solubilidad en agua, su polaridad, las características que le dan los grupos funcionales presentes, por citar algunos ejemplos); y unidos a los toxicólogos pueden caracterizar la toxicidad de una molécula y determinar si ese producto es carcinogénico, mutagénico, neurotóxico, etcétera.

3.5. Principio 5

Reducir el uso de sustancias auxiliares: se evitará, en lo posible, el uso de sustancias que no sean imprescindibles

Las sustancias auxiliares, particularmente los solventes, son muy importantes para la química. En muchos casos, las reacciones no se pueden llevar adelante sin ellos.

A la vez, los solventes representan entre el 50–80 % de la masa en una operación química estándar, dependiendo de si se incluye o no agua, el 75 % de los impactos ambientales, y son responsables de gran parte del consumo de energía, ya que los mismos implican calentamiento, enfriamiento, destilación, bombeo, filtrado, etc. La amplia mayoría de ellos son inflamables y

volátiles, o algunas veces, explosivos, esto contribuye a aumentar el riesgo y la toxicidad de una reacción química o un proceso (Anastas, Eghbali, 2010:305).

Algunos solventes utilizados habitualmente son conocidos por sus efectos en la salud del ser humano, y son en algunos casos bioacumulables o probadamente cancerígenos o mutagénicos; al ser volátiles contribuyen a la contaminación del aire, a la destrucción de la capa de ozono y a la generación de GEI (Doria Serrano:415).

Si bien siempre necesitaremos solventes, es una cuestión de balance. El objetivo es elegir disolventes que tengan sentido químicamente, y a la vez permitan reducir los impactos ambientales y de seguridad (Velasco, Rillada, Carrera:54; Mestres:109).

Para lograr la aplicabilidad de este principio existen varias alternativas. Por un lado, debería evaluarse el reemplazo de solventes de reconocida toxicidad como el hexano o el benceno, por heptano, tolueno, o disolventes oxigenados como el metanol o la acetona, preferibles a los primeros mencionados.

Sin embargo, la QV propone la utilización de solventes ideales. Entre ellos, los fluidos supercríticos, los líquidos iónicos o el agua (Franco-Vega, Palou, Ramírez-Corona, López-Malo:17).

Un fluido supercrítico es una sustancia que se encuentra en determinadas condiciones en un estado con propiedades intermedias entre líquido y gas (Velasco et ál.:55-56; Sierra et ál.:12; Anastas, Warner, 1998:40).

La tecnología basada en fluidos supercríticos permite que el CO_2 en ese estado (gas totalmente inocuo que en condiciones de presión y temperatura superiores a su punto crítico se convierte en un disolvente muy potente) sirva como elemento separador eficaz totalmente limpio. Sus principales ventajas radican en la fácil separación de sustancias; las suaves temperaturas en el proceso que permiten no dañar al producto; ser una sustancia no inflamable, no corrosiva, no tóxica, no cancerígena; en su capacidad selectiva y en la no generación de residuos, por lo cual con su utilización se cumple además el principio 1 de prevención (Velasco et ál.:55; Pájaro Castro, Olivero Verbel:173; Anastas, Warner, 1998:104; Anastas, Eghbali, 2010:305).

Algunas aplicaciones comerciales de la extracción al utilizar como solvente los fluidos supercríticos en la agroindustria agroalimentaria son: el fraccionamiento y la extracción de aceites y grasas, la extracción de antioxidantes naturales, la extracción de alcaloides, aromas y especias (Velasco et ál.:56).

En países altamente industrializados como Alemania y EE. UU. ya hay procesos industriales instalados que usan esta tecnología. Sin embargo, debido a que para su utilización se requiere equipamiento especial que soporte altas presiones, de altos costos, la mayoría de los desarrollos actuales son a escala piloto (González Barrios:13).

Los líquidos iónicos son una nueva generación de disolventes que han despertado interés por sus características especiales y sus posibilidades de aplicación (Castillo Borja:52; Franco-Vega et ál.:19; Doria Serrano:416; Pájaro Castro, Olivero Verbel:173).

Los líquidos iónicos son en realidad sales, formados por un catión generalmente orgánico, de naturaleza aromática y voluminoso, y un anión inorgánico que puede estar constituido por diferentes elementos químicos como Cl, P, F, BR, entre otros (Doria Serrano:416). Por su estructura química asimétrica, estos compuestos presentan propiedades especiales que los hacen atractivos en su reemplazo a los solventes tradicionales. Son líquidos a temperaturas menores a 100 °C, no son volátiles ni inflamables, esto minimiza los riesgos de contaminación del aire, pueden ser reutilizados, y tienen una alta capacidad de disolver tanto solutos polares como no polares. Al reemplazar el anión o el catión por otro adecuado se obtiene otro líquido iónico con diferente polaridad, viscosidad, etc.; ello ha alentado la investigación de modo de obtener solventes *a medida* o también llamado solventes de diseño (Franco-Vega et ál.:17).

Los líquidos iónicos se han utilizado a escala de investigación en electroquímica, reacciones catalíticas, separación de gases, celdas solares, aeronáutica, etc. (Castillo Borja:54). Sin embargo, si bien ya existen algunos procesos industriales basados en los líquidos iónicos implementados a escala industrial, los mismos están siendo estudiados en relación con su toxicidad (hay evidencia científica de ecotoxicidad frente a microorganismos de diferentes niveles en ecosistemas acuáticos) y su biodegradabilidad (comprometida por su estructura química), aplicación mediante el principio de prevención (Castillo Borja:54–55; Franco-Vega et ál.:20, 24; Doria Serrano:416; Sierra et ál.:10).

Utilizar agua como solvente posee amplias ventajas en cuanto a su bajo impacto ambiental, pero no todas las reacciones pueden utilizar sistemas acuosos para obtener el producto (Anastas, Eghbali, 2010:305). Por otra parte, se están realizando investigaciones para la implementación de métodos sin solventes en fase sólida que utilizan soportes porosos como arcillas y enzimas, y que actúan como catalizador de la reacción (Anastas, Warner, 1998:118).

3.6. Principio 6

Disminuir el consumo energético: el consumo energético debe ser examinado en función de sus impactos económico y medioambiental, y debe ser minimizado

El consumo de energía plantea costos económicos e impactos ambientales en prácticamente todas las síntesis y procesos industriales. Al aplicarse un enfoque sistémico, debe considerarse no solo la energía consumida en la producción, así como la generación de GEI asociada a esta, sino también el origen de la misma. La extracción y utilización de combustibles fósiles, así como la generación y utilización de energía eléctrica, presentan un impacto ambiental significativo.

Por consiguiente, debe minimizarse el consumo de energía. Una posibilidad de cumplimiento del principio 6, es buscar la manera en que los procesos se realicen en condiciones ambientales en lugar de usar temperaturas o presiones elevadas. Un enfoque exitoso a esto ha sido el empleo de procesos biológicos con la utilización de microorganismos o enzimas, donde los procesos deben realizarse a temperaturas moderadas y en ausencia de sustancias tóxicas (Doria Serrano:418; Anastas, Eghbali, 2010:307).

Otra alternativa es la utilización de técnicas como ultrasonido y microondas para acelerar las reacciones, así se disminuye el consumo energético (Doria Serrano:417; Sierra et ál.:6; Anastas, Warner, 1998:44). Las reacciones en fase sólida por otra parte, evitan la necesidad adicional de calentamiento de las sustancias auxiliares (solventes), y permiten el cumplimiento de los principios 5 y 6 de la qv.

Por otra parte, el análisis de las mejores condiciones de reacción y la realización de balances energéticos de todo el sistema, al utilizar herramientas como el Análisis de Ciclo de Vida (Acv), deberían ser una práctica constante a fin de conducir una reacción o un proceso en las condiciones que garanticen la eficiencia más que el rendimiento de los mismos.

3.7. Principio 7

Utilización de materias primas renovables: la materia prima ha de ser preferiblemente renovable en lugar de no renovable, siempre que sea técnica y económicamente viable

La utilización extensiva de recursos naturales como materia prima, sin tener en cuenta la velocidad a la cual los mismos pueden ser repuestos, es simplemente insustentable a largo plazo, tanto en el aspecto económico como en el medioambiental de la sustentabilidad. El alto consumo de combustibles fósiles no solo pone en peligro su disponibilidad para las futuras generaciones, sino que conlleva altos impactos ambientales para las presentes generaciones (Anastas, Warner, 1998:46; Anastas, Eghbali, 2010:306).

Así que, siempre que sea posible, deben usarse materias primas renovables en lugar de no renovables. Para ello es imprescindible que se mejoren aspectos de la agroindustria, agricultura, de los procesos de ingeniería asociados a las mismas, y se generen cambios en los mercados relacionadas con costos y ventajas económicas; es decir, aplicar un enfoque sistémico para lograr aportes de todas las disciplinas relacionadas: química, ingeniería, economía, ciencias ambientales, así como de políticas a largo plazo.

Los recursos de biomasa, como los residuos de la agroindustria, así como la energía solar, son una buena alternativa debido a su amplia disponibilidad (Spanevello et ál.:125).

El desafío técnico en el uso de tales materias primas renovables es el desarrollo de nuevos procesos no tóxicos que conviertan la biomasa en productos químicos útiles, de tal manera que generen menores impactos ambientales, sobre todo con un balance más positivo en la generación de GEI, comparado con los generados por el uso de combustibles fósiles (Spanevello et ál.:126; Anastas, Warner, 1998:95–96).

La mayoría de los disolventes que se emplean en la actualidad provienen del petróleo, recurso natural no renovable (Anastas, Warner, 1998:22). Una alternativa es su sustitución por otros procedentes de la biomasa (Vargas Afanador, Ruiz Pimiento:31). Muchos de estos disolventes, llamados disolventes renovables o biodisolventes, presentan baja toxicidad, baja volatilidad, no son corrosivos y tampoco carcinogénicos. Además, muchos de ellos se obtienen a partir de residuos vegetales, lo que los hace económicamente competitivos. De esta manera, se aplican los principios 5 y 7 de la QV.

En los últimos 10 años, se han realizado avances significativos en la utilización de recursos renovables como materias primas, como por ejemplo la obtención de biodiesel a partir de aceites de plantas y algas, bioetanol y butanol a partir de azúcares y de lignocelulosa, lo cual se ha logrado por la colaboración entre diferentes disciplinas como biotecnología, agronomía, toxicología, física, ingeniería y otros, que junto a la QV posibilitan apostar a la sustentabilidad (Anastas, Warner, 1998:22).

En el caso de los plásticos, se han realizado interesantes desarrollos recientes, debido a la creación del campo de los bioplásticos. Los bioplásticos se definen como aquellos plásticos que son biobasados (es decir generados a partir de biomasa), biodegradables (plásticos que se degradan por la acción de microorganismos), o que cumplen ambas características (Vázquez Morillas et ál.:2). Cuando los mismos se obtienen a partir de materias primas renovables, ya sea de origen animal o vegetal, adquieren en cierta medida la propiedad de biodegradabilidad, es decir que estos polímeros son susceptibles de ser degradados por microorganismos a corto plazo (Rodríguez:69–70).

Su estructura polimérica le permite mantener su integridad física durante su fabricación y uso, pero al finalizar su vida útil, cuando los mismos son desechados, sufren cambios químicos por influencia de agentes ambientales y microorganismos, que los transforman en sustancias simples (dióxido de carbono, metano, agua y biomasa) que luego de un tiempo son asimiladas en el medioambiente del suelo o acuático sin provocar daños a los mismos (Rodríguez:70). De esta manera, se estaría dando cumplimiento a los principios 1 y 10, además del presente principio.

3.8. Principio 8

Evitar la derivatización innecesaria: debe evitarse siempre que sea posible la innecesaria derivatización (grupos de bloqueo o de protección/desprotección, agentes de modificación temporal de procesos físicos y químicos)

Ocurre frecuentemente que las reacciones químicas necesarias para obtener un producto final sean parte de un proceso que implique varios pasos. Durante los mismos, es necesario muchas veces modificar o proteger partes o grupos de la molécula, la cual no resistiría o se vería afectada por la agresividad de un medio químico o un reactivo en particular.

En dichos casos, se utilizan diferentes sustancias como los llamados *grupos de bloqueo*, con el propósito de proteger una parte sensible de la molécula; o sustancias que se utilizan para que el producto adquiera determinada propiedad o sea formulado de determinado modo —por ejemplo, una sal—, o los reactivos utilizados para reacciones de sustitución, son algunos ejemplos de derivados utilizados comúnmente (Anastas, Warner, 1998:49).

Estas sustancias solo participan de un tramo del proceso de síntesis y no forman parte del producto final, por lo cual pasan a ser subproductos o residuos.

Entonces, este principio insta a minimizar la utilización de este tipo de agentes químicos.

Una de las mejores maneras de lograrlo es el uso de enzimas, ya que las mismas son muy específicas en su ataque a los grupos funcionales de una molécula. Además, poseen otras características que las hacen ideales para la aplicación de los principios de qv a los procesos de síntesis: estas actúan como catalizadores, acelerando la velocidad de la reacción, no se consumen en la misma, pudiendo ser reutilizadas, y son sustancias biodegradables, inocuas y no tóxicas.

Un ejemplo clásico del uso de enzimas para evitar el uso de grupos protectores es la síntesis industrial de antibióticos semisintéticos tales como ampicilina y amoxicilina, medicamentos que la industria farmacéutica produce por millones de toneladas anuales.

La síntesis inicial incluía un grupo protector de silicio, la utilización de pentacloruro de fósforo a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un proceso posterior de hidrólisis. La nueva ruta de diseño que utiliza la enzima penicilaza, cumple con el principio 8 de qv, reduce pasos y se desarrolla a temperatura ambiente, favoreciendo de esa manera la eficiencia energética (principio 6 de la qv).

3.9. Principio 9

Potenciación de la catálisis: se emplearán catalizadores lo más selectivos posible, reutilizables, en lugar de reactivos estequiométricos

Los reactivos estequiométricos se utilizan generalmente en exceso, una sola vez, y no siempre su selectividad es buena ni siempre forman parte del producto final, obteniéndose subproductos que aumentan la generación de residuos (Anastas, Eghbali, 2010:307).

Un catalizador se define como una sustancia que cambia la velocidad de la reacción, interviniendo en ella, pero sin formar parte de los productos resultantes de la misma. Un catalizador no altera el equilibrio químico y no es consumido por las reacciones que cataliza.

Los catalizadores tienen la capacidad de ser muy selectivos, se utilizan en pequeñas cantidades, son reutilizables, y comparados con los métodos tradicionales, requieren condiciones suaves de reacción, así que su uso mejora la eficiencia energética. Al acelerar la velocidad de reacción se produce un ahorro de tiempo, que lleva implícito un ahorro económico (González Barrios:3). Asimismo, al potenciar la catálisis se cumple el principio más importante de la QV, esto es la prevención en la generación de residuos.

Existen diferentes tipos de catalizadores, los cuales se emplean en distintos procesos catalíticos (homogéneos, heterogéneos, fotocatalíticos), pero al igual que en el proceso de síntesis mencionado para ejemplificar el principio 8, las enzimas son muy utilizadas como catalizadores biológicos en la aplicación de los principios de QV (Mestres:107). El área de la biocatálisis se ha extendido mucho en las últimas dos décadas, principalmente en las industrias farmacéutica y de química fina (Arroyo, Acebal, de la Mata:2-5; Doria Serrano:418; Pájaro Castro, Olivero Verbel:176; Vargas Afanador, Ruiz Pimiento:31; González Barrios:2).

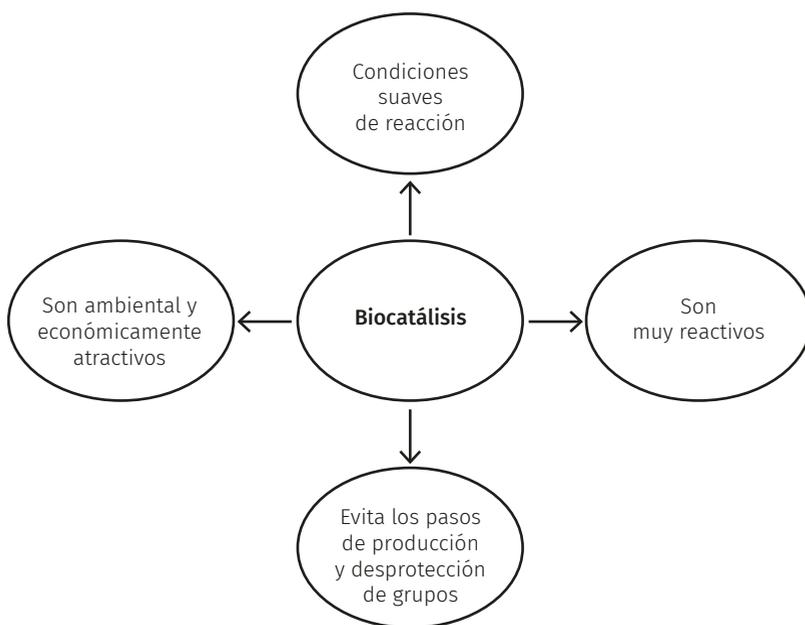


FIGURA 3.3. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOCATÁLISIS

Fuente: elaboración propia

3.10. Principio 10

Generar productos biodegradables: los productos químicos se diseñarán de tal manera que, al finalizar su función, no persistan en el medio ambiente, sino que se transformen en productos de degradación inocuos

Los productos deben diseñarse de modo que al finalizar su vida útil se descompongan rápidamente en productos inocuos.

En este principio, se está aplicando la estrategia de la QV de abordar cada uno de los pasos de un proceso productivo, en este caso en particular, no la elección de las materias primas ni el diseño del proceso, sino pensar anticipadamente en qué va a pasar una vez que el producto sea utilizado y descartado a la basura.

Uno de los ejemplos más claros de aplicación de este principio es la modificación del agente activo de superficie o surfactante en los detergentes domésticos (15 ó 20 años después de que estos fueron introducidos para el consumo masivo) para lograr un producto biodegradable. Los primeros surfactantes causaron problemas severos de formación de espuma en las plantas de tratamiento de aguas residuales y contaminación de suministros de agua, así como eutrofización de cursos de agua. La modificación química

para obtener un sustituto biodegradable resolvió el problema tecnológico (Pájaro Castro, Olivero Verbel:175; Anastas, Eghbali, 2010:307).

Otro ejemplo se refiere a los productos de plástico. En particular, en el caso de bolsas de plástico, se han desarrollado opciones que incluyen modificaciones químicas en el producto de manera de lograr, aunque sea parcialmente, la propiedad de biodegradabilidad (Mestres:110; Anastas, Warner, 1998:52).

La biodegradabilidad es una propiedad de las sustancias que las hace factibles de ser degradadas por microorganismos (Vázquez Morillas et ál.:4). Muchas sustancias químicas poseen esa propiedad, mientras que algunos compuestos sintéticos, y moléculas más complejas, o son de degradación lenta, o no son biodegradables en absoluto, característica que poseían las pasadas y muchas de las actuales bolsas de plástico.

En algunos casos, la característica de degradación es iniciada en el momento de la extrusión del polietileno, poliestireno o polipropileno, a través de la incorporación de una pequeña cantidad de un aditivo especial. Tal aditivo funciona a través de la descomposición de las ligaduras carbono-carbono en el plástico, lo que lleva a una disminución del peso molecular y al final, a una pérdida de resistencia y otras propiedades, lo que facilita la degradación posterior por microorganismos.

También denominados oxo-biodegradables, son materiales que desarrollan la descomposición vía un proceso de etapas múltiples usando aditivos químicos para iniciar la degradación. La primera etapa de degradación puede ser iniciada por la luz ultravioleta (uv) de la radiación solar, calor y/o tensión mecánica que inician el proceso de degradación por oxidación. De esta manera, se reduce el peso molecular del polímero debido a la rotura de las cadenas moleculares quedando un remanente con suficientemente bajo peso molecular que sería susceptible de desarrollar un proceso de biodegradación con el tiempo.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que estos desarrollos, nuevos materiales, nuevas tecnologías, surgidos con la contribución de la química, si bien son positivos, constituyen una solución parcial. Si aplicamos un enfoque sistémico, debe recordarse en primer lugar, que el mejor residuo es aquel que no se genera (principio 1 de qv). Y, por otra parte, debe atenderse al aumento de la demanda y las limitaciones de los recursos no renovables (en el caso del plástico, su origen son los combustibles fósiles), el aumento de la concentración de GEI que conlleva la producción a partir de combustibles fósiles, hábitos de consumo, etc. Ello implica apuntar la búsqueda a materias primas renovables, en las cuales la biodegradabilidad es una propiedad intrínseca.

3.11. Principio 11

Desarrollar metodologías analíticas para la monitorización en tiempo real: las metodologías analíticas serán desarrolladas para permitir una monitorización y control en tiempo real previo a la formación de sustancias peligrosas

La química analítica ha caracterizado y detectado problemas medioambientales desde el inicio de los movimientos ambientalistas. La *qv*, como se ha repetido a lo largo de este texto, es intrínsecamente preventiva. Es decir, hace de la prevención su lema. De allí que el foco se haya corrido actualmente al desarrollo de métodos y tecnologías que permitan la prevención y minimización de la generación de sustancias y residuos peligrosos en los procesos químicos (Anastas, Eghbali, 2010:308).

Un control y monitoreo cuidadoso de los procesos químicos, en tiempo real, es esencial para una operación segura, eficiente y con un mínimo de residuos. Este objetivo se ha hecho mucho más accesible por los modernos controles automatizados. No obstante, se requiere de un conocimiento preciso de la concentración de las sustancias y subproductos en el sistema, medidos en forma continua (Anastas, Warner, 1998:53). Por lo tanto, la práctica exitosa de la *qv* requiere técnicas de seguimientos o evaluación en tiempo real, acopladas con el control de proceso, de modo de detectar aun a nivel de trazas o cantidades muy pequeñas de sustancias tóxicas no deseadas, para poder ajustar los parámetros de reacción.

Para el cumplimiento de este principio, se precisa del trabajo conjunto de químicos e ingenieros con el objetivo común de mejorar y aplicar las técnicas y tecnologías disponibles que permitan, por un lado, realizar mediciones en línea, con la precisión necesaria para detectar las condiciones de temperatura, concentraciones parciales de especies químicas intermedias, presión y otras propiedades que permitan controlar que la reacción se está desarrollando con las condiciones prefijadas. Y, por otra parte, el desarrollo e instalación de equipos, analizadores, sensores, e instrumentos que contribuyan a obtener resultados analíticos fiables.

En este sentido, los sistemas de control y gestión de la seguridad de procesos son los encargados de producir en forma segura, protegiendo no solo a los trabajadores de una industria en particular o a las personas en general sino también al medioambiente, de los peligros propios de las sustancias químicas que se manipulan y de las condiciones físicas en las que las mismas son utilizadas. Estas estrategias poseen las ventajas adicionales de evitar la formación de residuos, mantener la eficiencia en el uso del agua y la energía, asegurar la calidad del producto en parámetros previamente establecidos y eliminar costos adicionales; todas ventajas para la competitividad industrial.

3.12. Principio 12

Minimizar el potencial de accidentes químicos: se elegirán las sustancias empleadas en los procesos químicos de forma que se minimice el riesgo de accidentes químicos

Los accidentes, tales como derrames, incendios y explosiones, constituyen un riesgo importante en la industria química. Estos accidentes no solo tienden a dispersar sustancias tóxicas en el medioambiente y a aumentar la exposición de los seres humanos y otros organismos a ellas, sino que son potencialmente peligrosos de por sí para la vida humana de los trabajadores de una industria. La industria química se ha hecho famosa en el mal sentido debido a situaciones de ambos tipos.

Por esta razón, es mejor evitar el uso o la generación de sustancias que probablemente reaccionen con violencia, produzcan quemaduras, desarrollen presiones excesivas o, de alguna forma, causen accidentes no previstos cuando son utilizadas en la industria.

Para atender este principio, se pueden optar por sólidos en vez de líquidos, o sustancias de baja presión de vapor en lugar de líquidos volátiles o gases, los cuales están asociados con la mayoría de los accidentes químicos.

También es de suma importancia en la tarea de evitar accidentes, la capacitación y el conocimiento por parte de todo el personal de una industria de los riesgos inherentes de cada sustancia, de la forma de actuar en caso de accidente, cómo usar elementos para controlar un incendio, conocer las causas y los factores asociados a dicho accidente y toda aquella información al respecto que resulte relevante. Establecer protocolos de seguridad, ingreso restringido a determinadas áreas de trabajo, planificación de evacuación de emergencia, salidas de emergencia, etc., son algunas de las medidas que se implementan de manera de minimizar el riesgo de accidentes. La capacitación y el conocimiento son estrategias netamente preventivas que colaboran en el cumplimiento de este principio de la qv.

CONCLUSIONES

Los 12 principios de la qv pueden expresarse en forma resumida de la siguiente manera:

- 1) Prevención
- 2) Economía atómica
- 3) Síntesis de toxicidad reducida
- 4) Diseño productos químicos seguros, eficaces, pero no tóxicos
- 5) Reducción del uso de sustancias auxiliares
- 6) Diseño para la eficiencia energética
- 7) Utilización de materias primas y energías renovables
- 8) Reducción de derivados
- 9) Potenciación de la catálisis
- 10) Generación de productos biodegradables
- 11) Análisis en tiempo real para prevenir la contaminación
- 12) Química inherentemente segura para la prevención de accidentes

Paul Anastas generó el nacimiento de esta nueva disciplina, la qv, también llamada química sostenible para aquellos a los que el término *verde* les resultaba inadecuado, dando comienzo a una nueva forma de hacer química, y con el convencimiento de que el día de mañana deje de llamarse qv para pasar a llamarse simplemente química.

Referencias bibliográficas

- ANASTAS, P.; EGHBALI, N.** (2010). Green Chemistry: Principles and Practice. *Chem. Soc. Rev.* (39), 301–312.
- ANASTAS, P.; WARNER, J.** (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. New York: Oxford University Press.
- ARROYO, M.; ACEBAL, C.; DE LA MATA, I.** (2014). Biocatálisis y biotecnología. *Arbor*, 190(768), 156. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.3989/arbor.2014.768n4010>
- CASTILLO BORJA, F.** (2015). Líquidos iónicos: Métodos de síntesis y aplicaciones. *Conciencia Tecnológica* (49), 52–56. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94438997007>
- DORIA SERRANO, M.** (2009). Química verde: un nuevo enfoque para el cuidado del medio ambiente. *Educación Química*, 20(4). Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2009000400004
- FRANCO-VEGA, A.; PALOU, E.; RAMÍREZ-CORONA, N.; LÓPEZ-MALO, A.** (2014). Líquidos iónicos: una alternativa «verde» para procesos de extracción en la industria de alimentos. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 8(1), 15–26. Recuperado de <https://tsia.udlap.mx/liquidos-ionicos-una-alternativa-verde-para-procesos-de-extraccion-en-la-industria-de-alimentos/>
- GARCÍA CALVO-FLORES, F.; DOBADO, J.** (2008). Química sostenible: una alternativa creíble. *An. Quím.*, 104(3), 205–210. Real Sociedad Española de Química. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2714924.pdf>
- GONZÁLEZ BARRIOS, I.** (2017). *Biocatálisis en disolventes verdes: la mejor estrategia para la producción de fármacos en disolventes sostenibles* (tesis de grado) Universidad Complutense de Madrid.
- MELÉNDEZ PIZARRO, C.; CAMACHO DÁVILA, A.** (2008). Química verde, la química del nuevo milenio. *Revista Synthesis* (45). Recuperado de https://www.academia.edu/22623658/QU%C3%8DMICA_VERDE_la_qu%C3%ADmica_del_nuevo_milenio
- MESTRES, R.** (2013). Química sostenible: naturaleza, fines y ámbitos. *Educación Química* (24), 103–112.
- PÁJARO CASTRO, N.; OLIVERO VERBEL, J.** (2011). Química verde: un nuevo reto. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 21(2), 169–182.
- RODRÍGUEZ, A.** (2012). Biodegradabilidad de materiales bioplásticos. *Ciencia y Tecnología de alimentos*, 22(3), 69–72.
- SIERRA, A.; MELÉNDEZ, L.; RAMÍREZ-MONROY, A.; ARROYO, M.** (2014). La Química verde y el desarrollo sustentable. *RIDE Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo educativo*, 5(9). Recuperado de <https://www.ride.org.mx/index.php/RIDE/article/view/1/5>

- SPANVELLO, R.; SUÁREZ, A.; SAROTTI, A.** (2013). Fuentes alternativas de materia prima. *Educación Química*, 24, 124–131.
- VARGAS AFANADOR, E.; RUIZ PIMIENTO, L.** (2007). Química verde en el siglo XXI: Química verde, una Química limpia. *Revista Cubana de Química*, xix(1).
- VÁZQUEZ MORILLAS, A.; ESPINOSA VALDEMAR, R.; BELTRÁN VILLAVICENCIO, M.; VELASCO PÉREZ, M.** (s.f.). Bioplásticos y Plásticos biodegradables. Universidad Autónoma Metropolitana. Asociación Nacional de Industrias del Plástico AC. Recuperado de <http://biblioteca.anipac.mx/biblioteca/degradabilidad-2/bioplasticos-y-plasticos-degradables>
- VELASCO, R.; VILLADA, H.; CARRERA, J.** (2007). Aplicaciones de los fluidos supercríticos en la agroindustria. *Información Tecnológica*, 18(1). Recuperado de <https://www.revistavirtualpro.com/download/aplicaciones-de-los-fluidos-supercriticos-en-la-agroindustria.pdf>
- YARTO, M.; GAVILÁN, A., MARTÍNEZ, M.** (2004). La Química verde en México. *Gaceta ecológica* (72), 35–44. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53907203>

Sitios de interés

- ACS.** <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/12-principles-of-green-chemistry.html>
- PLATAFORMA TECNOLÓGICA ESPAÑOLA DE QUÍMICA SOSTENIBLE.**
http://www.suschem-es.org/quienes_somos.asp

4 Ingeniería verde

1. INTRODUCCIÓN

El modelo productivo lineal surgido con la Revolución Industrial con el foco puesto en el aspecto económico, junto con un sistema basado en el consumo de una sociedad mundial creciente, son causantes del agotamiento y sobre-explotación de los recursos naturales, contaminación de suelo, agua y aire, generación de GEI responsables del calentamiento global y de cantidades de residuos. Ello resulta en un modelo insostenible a largo plazo, inequitativo, y el cual se aleja de la satisfacción de las necesidades básicas de la población, de la erradicación de la pobreza y de la mejora de la calidad de vida; objetivos fundamentales del Desarrollo Sustentable (DS).

La industria ha sido responsable de gran parte de los problemas ambientales mencionados, pero a la vez sigue siendo un medio de generación de ingresos y de puestos de trabajo que contribuye al desarrollo de cualquier país (UNIDO, 2011:10).

Por lo tanto, el reto está en transformar procesos productivos actuales, a la vez que se crean nuevas industrias, incorporando innovaciones tecnológicas con el objetivo de alinear a la industria en el DS para la búsqueda del equilibrio dinámico entre los aspectos sociales, económicos y medioambientales. La Ingeniería verde se enfoca en cómo alcanzar la sustentabilidad a partir de la ciencia y la tecnología.

2. INDUSTRIA VERDE: SURGIMIENTO Y DEFINICIONES

En 2003, más de 60 científicos, químicos, ingenieros, industriales, empresarios, funcionarios del gobierno de EE. UU., de la EPA y de la *American Chemical Society* (ACS) se reunieron para presentar y discutir aplicaciones de los principios de QV a la industria. Al cabo de varios días de deliberaciones, acordaron nueve principios aplicados a la industria, los que se conocen como la Declaración de Sandestin, por la ciudad de EE. UU. donde se reunieron, a los cuales posteriormente se añadieron tres principios más.

Estos 12 principios son parámetros en un sistema complejo e integrado con sus partes interrelacionadas e interdependientes (McDonough, Braungart, Zimmerman:437). Por ello, ocurre en muchos casos que al buscar una mejora en un dado aspecto a través de la aplicación de uno de los principios, se logran mejoras por cumplimiento de otros (Anastas y Zimmerman:95).

Surgió así la Ingeniería verde, en adelante IV, como un desprendimiento de la QV, con el objetivo no de crear una nueva disciplina, sino de aplicar esta visión a la industria en general y en el diseño de los procesos productivos en particular, para modificar las prácticas tradicionales en la industria a prácticas más sustentables, teniendo en cuenta el ciclo de vida del producto y aplicando un enfoque sistémico (García–Serna, Pérez–Barrigón, Cocero:11; Gómez Cívicos:169; Loayza Pérez, Silva Meza:110).

La IV hace énfasis en la etapa de diseño por considerar que es en esa fase donde se acuerdan muchos de los aspectos de mayor relevancia de la producción, comercialización y uso de un producto (McDonough et ál.:434; Gómez Cívicos:169).

Se entiende por IV al diseño, comercialización y uso de procesos y productos, técnica y económicamente viables, a la vez que se minimiza la generación de contaminación en origen y el riesgo para la salud y el medioambiente (García–Serna et ál.:17).

Es decir, una industria verde es aquella donde los aspectos económicos, sociales y medioambientales tienen el mismo peso, y donde el proceso es innovador, más eficiente, limpio y seguro para las personas (UNIDO, 2011:11; Anastas y Zimmerman:95; García–Serna et ál.:18). Ello se logra aplicando un enfoque sistémico que contemple escenarios espaciales y temporales, que tenga en consideración no solo el medio del cual se nutre sino también a la sociedad que en él se encuentra inserta y que requiere de sus productos, ya que puede ver afectada su salud y calidad ambiental. Es decir que una industria verde debe tener en cuenta desde la extracción, utilización y manejo de los recursos naturales y el consumo de energía, hasta la disposición final del producto una vez finalizada su vida útil.

La incorporación de mejoras e innovaciones productivas provocará resultados económicos bastante rápidos, lo cual posibilitará a la industria la competencia con otras empresas así como el acceso a mercados más exigentes, dado que a nivel mundial son cada vez mayores los requisitos demandados por gobiernos y ciudadanos del mundo.

Por otra parte, para lograr procesos productivos sustentables o más sustentables, la IV utiliza herramientas y/o enfoques como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), diseño integrado de la cuna a la cuna, Producción Más Limpia (PML), Ecología y Simbiosis industrial; conceptos estos que se plantean más adelante, y fundamentalmente la inherencia como característica intrínseca de la IV.

3. 12 PRINCIPIOS DE INGENIERÍA VERDE

La Tabla 4 resume sus enunciados:

TABLA 4. 12 PRINCIPIOS DE INGENIERÍA VERDE

12 Principios de Ingeniería verde	
Principio 1	Inherentemente inocuo, más que circunstancial
Principio 2	Prevención, en lugar de tratamiento
Principio 3	Diseño para separación
Principio 4	Maximizar la eficiencia
Principio 5	Producción bajo demanda
Principio 6	Conservar la complejidad
Principio 7	Durabilidad, más que inmortalidad
Principio 8	Satisfacer la necesidad, minimizar el exceso
Principio 9	Minimizar la diversidad de materiales
Principio 10	Integrar flujos de materia y energía
Principio 11	Diseñar para su comercialización <i>afterlife</i>
Principio 12	Materias primas y energías renovables, más que no renovables

3.1. Principio 1

Los diseñadores deben esforzarse por asegurar que todas las entradas y salidas de materia y energía sean tan inherentemente inocuas como sea posible

El primer principio de IV alienta a tener en cuenta todo tipo de riesgo, desde el diseño de las operaciones hasta el final de la vida útil del producto, a fin de minimizarlo. Apunta a que la inherencia sea una característica intrínseca y no ocasional, tanto internamente (para los trabajadores) como externamente (la sociedad y su entorno natural) (McDonough et ál.:437).

Ello incluye las características químicas de las sustancias empleadas, como ser su inflamabilidad, explosividad, etc. así como las condiciones de temperatura y presión utilizadas, además de la toxicidad de las mismas para todos los seres vivos y el medioambiente en general.

Minimizar los riesgos es actuar preventivamente, y ello supone una diferencia no solo en el control y monitoreo circunstancial sino también en la exposición de los trabajadores industriales y de la sociedad en la cual está inmersa esa industria. Ello puede lograrse reemplazando sustancias químicas por otras de menor toxicidad o peligrosidad, de manejo más seguro, es decir minimizando los riesgos implícitos en su manipulación y modificando las condiciones extremas de presión y temperatura (García-Serna et ál.:13). También se puede recurrir a métodos de separación física como la micro-filtración, en lugar de utilizar sustancias químicas que luego se convertirán en un residuo.

Al aplicar un enfoque sistémico en la realización de balances de masa y energía que contemplen todo el ciclo de vida del producto, se evita la generación de residuos peligrosos y contaminación medioambiental; asimismo, al tener en cuenta la toxicidad de un producto se extiende el análisis fuera del proceso de fabricación.

Los balances de energía no implican únicamente analizar la eficiencia en su utilización y conversión sino también tener en cuenta la fuente de la misma (renovable versus no renovable) así como otras variables —como su disponibilidad, costo, impacto ambiental, etc.—, y que deben atenderse desde el diseño del proceso hasta el diseño de los equipamiento de los sistemas de control (necesarios estos para que la seguridad sea intrínseca al mismo). Sumado a ello, con la selección adecuada de sustancias químicas involucradas en el proceso, es posible controlar mejor el tipo de energía y su cantidad para las operaciones de calentamiento, enfriamiento, bombeo, etcétera.

Todo ello no implica que periódicamente se realicen controles y monitoreo que permitan detectar fugas y situaciones fuera de punto, pero el proceso es en esencia más seguro, menos riesgoso y preventivo en la ocurrencia de accidentes industriales.

3.2. Principio 2

Es mejor prevenir la generación de residuos que tratar o limpiar el residuo ya producido

Los residuos de un proceso se generan cuando las materias primas utilizadas no forman parte total del producto. Ello implica un costo por partida doble: el costo como materia prima y el costo como tratamiento de los residuos producidos, y de la contaminación generada. Por lo tanto, debe tenerse en cuenta la eficiencia del proceso en cuanto a la formación de producto.

Para cumplir este principio deben tenerse en cuenta aquellas corrientes que a veces no lo son: como las pérdidas de materia prima en la carga y descarga; o lo que a veces se asume como un residuo pero puede no serlo,

como los barros generados por tratamientos de efluentes, los cuales pueden transformarse en un subproducto del proceso o incorporarse a otro emprendimiento productivo como materia prima (Gómez Cívicos:171).

La modificación de los parámetros de la reacción es otra posibilidad a tener en cuenta: una modificación en la velocidad de reacción puede favorecer o desfavorecer la formación de subproductos, y la recirculación de un reactivo en exceso puede evitar la generación de un residuo.

Por otra parte, el concepto de residuo es relativo y debería considerarse como algo a lo que aún no se ha encontrado utilidad o ubicación (Anastas y Zimmerman:97). Como veremos más adelante, lo que para una industria puede suponer un residuo, para otra puede ser su materia prima.

Respecto de la energía, un enfoque de ciclo de vida deberá incluir el análisis de la generación de GEI durante la vida útil del producto y no solamente durante la fabricación del mismo.

3.3. Principio 3

Las operaciones de separación y purificación deberían diseñarse para minimizar el consumo de energía y el uso de materiales

Dentro de esta guía de prácticas industriales más sustentables, este principio apunta a las operaciones de separación y purificación debido a los altos consumos de energía, agua, materias primas y monitoreo y control de procesos involucrados en cualquier industria química (Gómez Cívicos:172).

La destilación, por ejemplo, conlleva un costo importante en el uso de la energía y deberían buscarse alternativas tecnológicas para evitar esta operación o hacerla más eficiente (Anastas y Zimmerman:98). La separación líquido-líquido, en el mismo sentido, añade la generación de residuos a partir de la utilización de solventes que deberán luego recibir tratamiento o disposición final ya que no se incorporan al producto final. De este modo, una alternativa es la utilización de equipos de reacción donde se realicen ambas operaciones (tecnologías intensivas), como son los llamados reactores extractivos, donde el producto se separa inmediatamente después de ser formado. Un ejemplo es la producción de acetato de metilo, que pasó de utilizar ocho columnas de destilación, un equipo de extracción líquido-líquido y un decantador, a realizar la producción en una sola etapa en un solo equipo.

En cuanto a mejoras en la eficiencia energética, se han desarrollado membranas de nuevos materiales con alta selectividad, como las utilizadas en ósmosis inversa para el proceso de desalinización de agua, y a escala piloto existen desarrollos donde la energía es provista por celdas fotovoltaicas (energía solar), lo cual es un buen ejemplo de aplicación de este principio.

3.4. Principio 4

Los productos, procesos y sistemas deberían diseñarse para la maximización de la eficiencia en el uso de materia, energía y espacio

La eficiencia en el uso de la energía, de las materias primas, del tiempo y del espacio es un aspecto que siempre se tiene en cuenta debido a que contiene implícitos costos económicos. Sin embargo, este principio apunta a revisar frecuentemente las condiciones de operación, las concentraciones de reactivos utilizadas, su punto de incorporación al proceso, de modo de asegurar dicha eficiencia (Gómez Cívicos:172). Aun en un proceso optimizado, es necesario un monitoreo en tiempo real (principio 11 de QV) para asegurar que el sistema opera en las condiciones de diseño previstas (Anastas y Zimmerman:98).

Este principio insta a aplicar un enfoque sistémico, a no concentrarse puramente en una estructura molecular o en las condiciones de funcionamiento de un equipo en particular sino en mirar el proceso como un todo; porque materia, espacio y energía están interrelacionadas y son interdependientes: la modificación de los parámetros de una variable influirá inmediatamente en los otros aspectos. El reemplazo de un reactivo estequiométrico por uno catalítico logra la eficiencia en el uso de la materia prima y la energía, más si el reactivo catalítico es una enzima que requiere de condiciones suaves de reacción. A su vez, ello redundará en un proceso más seguro y facilita el proceso de separación (principio 3 de IV).

Respecto al espacio, se refiere no solo a la planificación en la ubicación espacial de los diferentes equipos dentro de la planta sino a las nuevas tendencias de intensificación de los procesos; se apunta con esto a equipos de menor porte con las mismas prestaciones (Anastas y Zimmerman:98). La utilización de micro reactores es un claro ejemplo de ello, ya que operan continuamente a muy bajo volumen con mezcla eficiente, obteniéndose una alta productividad al utilizar menores cantidades de materia prima comparados con un reactor convencional. Debe incluir sistemas de seguridad que equilibren los riesgos que podría involucrar la intensificación del proceso.

3.5. Principio 5

Los productos, procesos y sistemas deberían estar orientados hacia la «producción bajo demanda» (*output pulled*) más que hacia el «agotamiento de la alimentación» (*input pushed*)

Este principio apunta a aplicar la filosofía de origen japonés llamada *Just in Time* o JIT, por sus siglas en inglés. Esta forma de producción consiste en obtener las cantidades estrictamente necesarias y en el momento preciso (Anastas y Zimmerman:98). Las ventajas de esta metodología son principalmente la reducción en la necesidad de almacenamiento, reducción de costos y aumento de la productividad.

Ello implica aplicar un mantenimiento preventivo de todos los equipos y máquinas que asegure una línea de producción continua o que al menos no se interrumpa por desperfectos, además de la aplicación de protocolos de monitoreo y control constante.

La producción no debería basarse únicamente en la disponibilidad de materias primas y energía a bajo costo o en el consumo de productos; no debería olvidarse que los modelos económicos imperantes, a través del marketing y la publicidad han logrado generar un consumidor siempre insatisfecho, situación insostenible a largo plazo.

Los programas de prosumidores de energía son un ejemplo de aplicación del principio 5 de iv. En ellos, el consumidor genera energía, consume solo la que necesita y devuelve a la red el excedente. En otros casos, el prosumidor genera energía de origen renovable, por ejemplo a través de la utilización de celdas fotovoltaicas, en la medida de sus necesidades, y accede a la red solamente para complementar la energía renovable generada en su hogar.

Otro ejemplo relacionado a la conversión de materia prima en producto en una reacción química, implica su diseño e implementación de modo tal que se propicie el desplazamiento de la reacción hacia el producto para que este sea eliminado del medio de reacción.

El principio de Le Châtelier establece que cuando se produce una presión a un sistema en equilibrio, el sistema se reajusta para aliviar o compensar esa presión aplicada. En este caso, cuando decimos presión nos referimos a cualquier factor impuesto —como temperatura, presión o gradiente de concentración— que altera el equilibrio entre las velocidades de transformación directa e inversa.

Por ejemplo, aumentar la entrada a un sistema causa un desequilibrio que se alivia con un aumento en la salida. A menudo, una reacción o transformación es impulsada hacia el producto basado en este principio, ya sea

modificando la temperatura o uno de los reactivos, para desplazar el equilibrio y generar la salida deseada. Esto también se puede lograr diseñando transformaciones en las que las salidas se minimizan continuamente; por ejemplo, eliminando el producto del medio de reacción a medida que el mismo se va formando, entonces la reacción se desplaza sin necesidad por exceso de energía o material.

3.6. Principio 6

La entropía y la complejidad inherentes deben ser consideradas como una inversión al elegir entre reutilizar, reciclar o enviar a disposición final a un residuo

En un suelo destinado a la obtención de madera para fabricar papel, los árboles son un monocultivo, un sistema productivo totalmente simplificado, con un solo objetivo. Por el contrario, en un ecosistema natural un bosque nativo brinda importantísimos servicios ambientales. La variedad de especies animales y vegetales que lo habitan, sus interconexiones, muestran una complejidad que funciona desde el inicio de los tiempos y que el ser humano debería tener siempre presente.

Este principio propone examinar un producto teniendo en cuenta los desarrollos de investigación que llevaron a su fabricación, la innovación en materiales con los cuales está hecho, la energía y el agua que se utilizó, etc., para diferenciar los casos en que el reciclado de sus elementos y/o materias primas sea más conveniente que su reutilización para el mismo u otro fin, de aquellos en que su valor intrínseco no pueda ser ignorado. Es decir, tener en cuenta no solo el valor económico de un objeto sino las inversiones de distinto tipo que se realizaron para obtenerlo.

El reciclado es fundamental en su contribución para la no generación de residuos; objetivo básico de la QV y la IV, pero el mismo por sí solo nunca será suficiente.

Por otra parte, la complejidad estructural de los materiales obtenidos actualmente, no solo a nivel molecular sino por su combinación en el producto final, dificultan la separación y el reciclado de sus unidades elementales. De allí la importancia del diseño del producto pensando a futuro, incluyendo su obtención, utilización y disposición final, con un enfoque sistémico.

En una botella de plástico, por ejemplo, el plástico como material será útil para su reciclado, mientras que una pieza electrónica de un motor debería ser reutilizada o diseñada para su utilización en el mismo u otro equipo una vez finalizada su vida útil.

Este principio implica un balance entre simplicidad y complejidad tanto en el diseño como en los materiales utilizados para la fabricación de un producto. Una pieza compleja debería poder utilizarse para diferentes equipos, como por ejemplo, los cargadores universales para teléfonos celulares, que reemplazaron a los cargadores diferentes para cada tipo de celular. En este caso se favorece la reutilización en lugar del reciclado.

3.7. Principio 7

Diseñar para la durabilidad, no para la inmortalidad

Existen productos que se utilizan o pueden utilizarse durante años; otros productos duran en nuestras manos días, horas o minutos y luego son desechados. Un producto debería diseñarse teniendo en cuenta el tiempo durante el cual será utilizado y para que al finalizar su vida útil el mismo sea biodegradable, no persistente, ya que de otra manera ello constituye un defecto del producto.

Con el diseño de un producto para su durabilidad durante su vida útil, evitando la inmortalidad al finalizar la misma, se logra disminuir los impactos medioambientales relacionados a la persistencia, toxicidad y bioacumulación y se disminuyen los riesgos para la salud humana (Anastas y Zimmerman:99).

Un ejemplo de ello es la obtención de plásticos biodegradables como el ácido poliláctico (Anastas y Zimmerman:99). El ácido poliláctico es un biopolímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico. Debido a su biodegradabilidad y otras propiedades, posee numerosas aplicaciones industriales. Además, por ser bioabsorbible (biocompatible) se utiliza en prestaciones médicas —como material de sutura, implantes y tornillos— ya que se despolimeriza totalmente por hidrólisis acuosa (Zuluaga:125–142).

Otro ejemplo son los recientes desarrollos de pañales descartables biodegradables o compostables, que si bien tienen un costo un poco superior a los pañales descartables comunes, el mismo es competitivo, con la ventaja de una responsabilidad ambiental en la generación de residuos y su disposición final adecuada.

3.8. Principio 8

Satisfacer la necesidad, minimizar el exceso

Sobredimensionar las instalaciones es un punto que los ingenieros habitualmente consideran en el diseño de una planta o un equipo en particular, atendiendo a futuros aumentos en la demanda o en las entradas de materia prima, o eventuales situaciones que impliquen la necesidad de contar con pulmones que no comprometan la producción.

Este principio sostiene la importancia de efectuar un pormenorizado análisis de modo de evitar los costos por sobredimensionamiento, no solo en el proceso en sí sino en el producto final.

Un ejemplo emblemático tiene que ver con los automóviles (como las camionetas todoterreno) con prestaciones para suelos especiales entre otras, que no son necesarias para su uso urbano; o los autos de gran porte cuando los mismos son utilizados por una sola persona. Si bien ambos casos están ligados a cuestiones sociales de consumo, su mención no es casual, ya que se basa en la interrelación implícita de los aspectos sociales y económicos.

Otro caso es la incorporación al mercado de los autos eléctricos, que utilizan energías limpias para su carga, minimizando la contaminación de aire y la generación de GEI. Los autos eléctricos se encuentran actualmente con obstáculos debido a su alto costo, a la pobre duración de sus baterías y a la falta de infraestructura pública de carga, pero importantes empresas de fabricación a nivel mundial están apostando a ellos, no solo por su independencia de los combustibles fósiles sino también por sus ventajas medioambientales.

3.9. Principio 9

Minimizar la diversidad de materiales

Este principio plantea un desafío debido a que, por un lado, un objeto obtenido con pocos materiales o con materiales simples favorece ampliamente su reciclado posterior, pero por otro, la diversidad de materiales empleados es lo que ha permitido darle valor agregado a un producto, y en muchos casos ha permitido una disminución de costos que transforma el producto en económicamente viable. En todo caso, lo que plantea este principio es buscar un equilibrio entre el producto deseado (en las materias primas utilizadas en su fabricación) y en el modo en que se ensamblan los mismos, de modo que ello asegure de alguna manera que sus componentes puedan volver al ciclo.

Ello significa un balance entre costos, materias primas y características como biodegradabilidad y reciclado del producto obtenido al finalizar su

vida útil. Una opción es modificar las características químicas de la molécula desde el diseño para otorgarle las propiedades deseadas, de modo que eliminen o minimicen la utilización de aditivos para lograrlo. Otro ejemplo de aplicación de este principio son los productos conformados por multicapas de materiales diferentes, ya que se logra un ahorro en materias primas a cambio de otras con la misma función pero de menor costo —a esto agreguemos la factibilidad de separación de capas y reciclado de materiales una vez finalizada su vida útil.

3.10. Principio 10

Cerrar los ciclos de materia y energía del proceso tanto como sea posible

Ello puede lograrse si se aplica un enfoque sistémico en lugar de enfocarse en un equipo o una etapa del proceso. Una visión más amplia de un proceso productivo como un todo —con entradas, salidas y recirculaciones, donde cada operación se relaciona con la anterior y la posterior, donde la modificación de una variable de operación afecta a todo el sistema— permitirá detectar puntos de mejora.

Estas mejoras pueden lograrse a diferentes escalas: a escala de todo el proceso productivo, por ejemplo evaluando las posibilidades de recuperación de agua y energía globales, o en el marco de una etapa del proceso en particular, como por ejemplo en la utilización de corrientes de calentamiento y enfriamiento, o incorporando el subproducto de una etapa como la materia prima de otra (Anastas y Zimmerman:100; Gómez Cívicos:174).

Retomemos el ejemplo de los autos eléctricos híbridos mencionado para ejemplificar el principio 8: en ellos el calor generado por el frenado, que generalmente se pierde, es capturado invirtiendo el motor eléctrico. El motor se convierte entonces en un generador eléctrico creando electricidad que alimenta a una batería y se almacena como energía para impulsar el vehículo (Anastas y Zimmerman:100). De esta manera se cierra el ciclo.

Pero además, la industria que se ha propuesto como objetivo ser más sustentable deberá atender a otros emprendimientos productivos cercanos y a estar dispuesta a compartir información que les permita obtener beneficios mutuos, en lo que se conoce como *simbiosis industrial*, término de la Ecología industrial, como se desarrollará más adelante en este capítulo.

3.11. Principio 11

Diseñar para la reutilización de componentes tras el final de la vida útil del producto

Muchos de los productos que utilizamos en nuestra vida cotidiana son desechados aun antes de su rotura irreparable, ya sea por recambio tecnológico o por obsolescencia programada. El mejor ejemplo de ello son los teléfonos celulares y los equipos de informática.

Este principio de IV involucra lo que se conoce como Responsabilidad Extendida del Productor (REP), la cual, en aquellos países que cuentan con la legislación correspondiente, significa que una industria no es solo responsable de sus productos hasta la salida de fábrica, sino también durante su uso, manipulación y cuando el mismo finalizó su vida útil y se transformó en un residuo.

Atendiendo siempre a buscar la prevención en la generación de residuos, y teniendo en cuenta los impactos ambientales asociados a los mismos, los costos de fabricación, la utilización de agua, recursos, energía, así como las prácticas sustentables que los principios de IV vistos hasta el momento proponen, debería pensarse en la reutilización del producto/residuo o de sus elementos constituyentes para cerrar el ciclo. Entonces, a partir de opciones tecnológicas, estos elementos residuales se convierten en nuevas materias primas. Este enfoque, sin residuos, se conoce como enfoque *de la cuna a la cuna* y simula los ciclos biológicos de la naturaleza (García-Serna et ál.:12).

En algunos casos esto se logra fácilmente con materiales que admiten ser reutilizados una y otra vez, con o sin un tratamiento que les devuelva sus propiedades originales, como es el caso del vidrio. Pero en otros casos no es tan sencillo. La industria Dupont creó el proceso químico conocido como Petretec, a partir del cual es posible el reciclado de poliésteres como films, fibras y plásticos, y se obtiene así el polímero original —a diferencia del reciclado mecánico del PET del cual se obtiene trozos de plástico—, y de esa manera se evita que los mismos vayan a basurales o rellenos sanitarios en el mejor de los casos, reduciendo los impactos ambientales relacionados. Por este proceso, Dupont fue nominada en 1997 al Premio Presidencial de Química verde, premio que se otorga anualmente en EE. UU. como reconocimiento a innovaciones químicas que previenen la contaminación y promueven la sustentabilidad.

Un ejemplo a escala de sistema es la reconversión de viejos edificios (antiguas industrias abandonadas) en espacios públicos, culturales o para la realización de eventos.

3.12. Principio 12

Las entradas de materia y energía deberían ser renovables

La sustentabilidad implica una actividad de producción que pueda realizarse indefinidamente. Significa tener en cuenta que los recursos naturales son finitos, muchos de ellos no renovables. Por lo tanto, considerando las tasas de crecimiento poblacional mundial así como los hábitos de consumo de las sociedades de los países desarrollados, la industria necesariamente requiere de un cambio hacia materias primas y energía obtenidas de fuentes renovables.

La utilización de biomasa, ya sea de cultivo o a partir de residuos de la agroindustria para la producción de biocombustibles y el tratamiento de residuos sólidos urbanos clasificados en origen para la obtención de biogás son ejemplos de aplicación de este principio; así también se puede nombrar la fabricación de plásticos biobasados (Anastas y Zimmerman:100) y la utilización de energía solar, eólica o geotermal como fuente de energía industrial (McDonought et ál.:436).

4. ECOLOGÍA INDUSTRIAL

4.1. Introducción

En los años 50 los ecologistas defendían las medidas de *final de tubo* –*end of pipe* en su idioma original, como por ejemplo filtros, plantas de tratamiento de aguas residuales, etc.– como una manera de reducir el impacto ambiental de la industria (UNIDO, 2008:7–9). Esto reflejaba la concepción de que era necesario separar a la industria del entorno. Este pensamiento generó impactos ambientales y sociales, y las soluciones solo eran aplicables a la industria en cuestión pero no al entorno.

Posteriormente apareció el concepto de Producción Más Limpia (PML), definida como la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva aplicada a los procesos, productos y servicios para aumentar la eficiencia global y reducir los riesgos para la salud humana y el medioambiente (UNIDO, 2008:7–9; Loayza Pérez, Silva Meza:112). Este criterio supuso un fuerte avance ya que implica la modificación de los procesos productivos para producir menos residuos o que estos sean menos contaminantes. Pero sigue siendo un enfoque aplicado a empresas de forma individual.

Durante millones de años la naturaleza se ha caracterizado por la capacidad de cerrar sus ciclos; ha ido optimizándolos para minimizar la pérdida de materia y energía que se produce. Por todos es conocido el ciclo de la vida: una gacela se alimenta de un arbusto, el león se alimenta de la gacela,

y este al morir, sirve de alimento para ese arbusto. Pero, ¿qué ocurre con los seres humanos? Desde que comenzó la Revolución Industrial nuestra forma de consumir dejó de ser cíclica para ser lineal.

Desde hace algunas décadas se ha venido intentando aprender de la naturaleza y a partir de ella aplicar en los procesos productivos las estrategias que la misma ha ido desarrollando a lo largo del tiempo (Rosemberg 2006; Pinzón Latorre:155; McDonough et ál.:436).

La Ecología industrial, en adelante EI, da un paso que supone un cambio de concepción: el sistema industrial es visto como un ecosistema donde la actividad industrial está relacionada con el entorno y el medio social. Es por ello que en él se engloban a algunos sistemas humanos: agricultura, transporte, producción, etcétera.

La EI es un enfoque que surge en la década del 70 pero comienza a ponerse realmente en práctica a mediados de los 90, basada en la ingeniería de sistemas y en principios ecológicos. Esta integra los aspectos de producción y consumo, desde el diseño, la producción, el uso y la finalización de su vida útil, tanto de productos como de servicios, de tal manera que se minimice el impacto ambiental.

La EI es un área interdisciplinaria que intenta asimilar el funcionamiento de los ecosistemas industriales al de los naturales, con una interrelación entre industrias, el medio social y natural que tiende a cerrar el ciclo de materia y quiere llevar los sistemas industriales hacia el DS (Cervantes Torre-Marín, Sosa Granados, Rodríguez Herrera, Robles Martínez, 2009:65; Loayza Pérez, Silva Meza:110). Es decir, así como los ecosistemas naturales normalmente funcionan por energía solar y fotosíntesis, y consisten en una reunión de organismos que interactúan mutuamente y con su medioambiente para el intercambio de materiales de una manera principalmente cíclica; del mismo modo, la EI funciona dentro de grupos de industrias y/o empresas que utilizan materiales y subproductos de cada una de las otras, de forma que los materiales de desecho se reduzcan al mínimo.

La EI puede describirse entonces como el estudio de las interacciones e interrelaciones físicas, químicas y biológicas, dentro de los sistemas industriales, naturales, sociales y al mismo tiempo las interacciones entre ellos.

Esta relación entre industrias tiene como uno de sus objetivos, tender a cerrar el ciclo de materia y por lo tanto, a obtener un nivel cero de residuos. Esto se logra en parte usando los residuos de una industria como materia prima de otras, como pasa en los ecosistemas naturales.

Aplica una visión sistémica al situar la actividad productiva como parte de un sistema más grande que la contiene, analizando las entradas de recursos y las salidas de residuos, así como la manera en que esa actividad productiva impacta sobre el entorno (Cervantes Torre-Marín, 2011:60).

La EI, como el DS, incluye aspectos medioambientales, sociales y económicos –aunque por definición se vincula más a la dimensión ecológica–, lo cual se evidencia cuando la EI aplica criterios tales como: cierre de ciclo

de materia, desmaterialización, fomento de la ecoeficiencia, obtención de ganancias por venta de residuos, fomento del capital social local, incremento y mejora de los puestos de trabajo, entre otros.

La EI comporta beneficios económicos, medioambientales y sociales tales como el ahorro de recursos, la minimización de residuos, la disminución de emisiones y cargas contaminantes, la disminución de costos ambientales, la mejora en puestos de trabajo, la creación de redes, la mejora de la imagen ambiental de las empresas, entidades y municipios y la mayor relación y colaboración dentro del sector industrial y de este con el medio social y natural.

Porque además de un sistema de industrias, este sistema se relaciona con el entorno que lo rodea, tanto social como medioambiental, y extiende sus preocupaciones desde las materias primas que utiliza como recursos hasta la disposición final como residuo de su producto, por lo cual aplica un enfoque *de la cuna a la tumba*. Y al tener como objetivo el DS, obtiene mejoras tanto en el corto como en el largo plazo.

Un grupo de empresas que funciona de esta manera constituye un *ecosistema industrial*, donde el metabolismo es la forma como se procesan la materia y la energía y el término *simbiosis industrial* se refiere a las interrelaciones entre las diferentes industrias que conforman el ecosistema industrial, es decir cómo se apoyan o potencian mutuamente, al igual que lo hacen los microorganismos (Rosemberg 2006; Cervantes Torre–Marín et ál., 2009:65; Loayza Pérez, Silva Meza:110). Cabe notar que los términos utilizados derivan de la Ecología (McDonough et ál.:436).

La EI parte de la base de que todo lo que se genera en un proceso tiene valor. Lo que para una empresa puede ser un residuo para otra puede ser la materia prima, donde todo puede ser reciclado, transformado, valorizado. Respecto de los contaminantes presentes en un efluente industrial, ya sea líquido o sólido, la cercanía de otra industria que lo reciba directamente, sin dilución, es fundamental.

Para lograr sus objetivos, la EI se sirve de métodos que contribuyen a disminuir el impacto ambiental, mejorar la ecoeficiencia y aumentar la rentabilidad, siempre tendiendo hacia un mayor DS. Por tanto, en el estudio o la implantación de un ecosistema industrial se pueden usar métodos y herramientas como el ACV, la PML, el análisis de flujo de materia, el análisis económico–ambiental, la ecoeficiencia, los indicadores de DS, las bolsas de residuos o subproductos, la Huella de carbono y Huella ecológica, etc., pero atendiendo a que lo más específico de la EI es crear una red de industrias vinculadas por sus residuos y a la vez relacionadas con el entorno social y natural.

El metabolismo será posible siempre que se evite la dilución de la contaminación para así favorecer el reciclaje de elementos. Otras condiciones de éxito se refieren a la cercanía geográfica de las industrias que realizarían la simbiosis para que los intercambios sean factibles y rentables; y sus

actividades deberían contener cierta diversidad al igual que en un ecosistema natural (McDonough et ál.:436–437; Cervantes Torre–Marín et ál., 2009:68).

Una de las razones de mayor peso a la hora de definir el éxito o fracaso de un grupo de industrias que apunten a concretar un ecosistema industrial se refiere a vencer resistencias a la hora de relacionarse y compartir información. Este es uno de los desafíos para las industrias de la actualidad y que apunta al futuro, porque implica una visión de industrias interrelacionadas, cooperativas y no competitivas, y de formación de redes donde el intercambio no es solo material. La EI crea redes socioeconómicas entre industrias, entre industrias y sus proveedores y con la sociedad, a partir de las cuales surgen beneficios, colaboraciones y nuevas oportunidades (Cervantes Torre–Marín, 2011:60).

Así planteada, la EI posee numerosas ventajas que se ven potenciadas cuando las industrias se encuentran cercanas ya que tienen la motivación de realizar innovaciones, o por el contrario, existen normativas que comienzan a imponer límites a la producción. También ayuda a la creación de algún ente que actúe como coordinador. Pero la mayor ventaja se refiere a la gestión de residuos, porque los mismos permanecen dentro del ciclo y se evita de este modo un posible foco de contaminación, además de la disminución de costos (Cervantes Torre–Marín et ál., 2009:68).

Para ello, las herramientas más importantes son el reciclaje y la reutilización, que se puede lograr de diferentes maneras:

- Reciclaje directo como materia prima al generador. Es decir, retorno de aquellas que no han sido consumidas en un proceso de síntesis. Por ejemplo, en las fábricas de herramientas de acero, aquellas virutas que se desechan de los moldes vuelven a fundirse para reincorporarse en la cadena de valor.
- Transferencia como materia prima a otro proceso. Esto es, un producto de desecho puede servir como materia prima para otro. Por ejemplo, el reciclaje de los neumáticos para crear el asfalto de las carreteras.
- Utilización de los residuos para el control de la contaminación o para el tratamiento de otros residuos. Por ejemplo, los residuos alcalinos pueden utilizarse para neutralizar compuestos ácidos.
- Recuperación de energía. Como ejemplo tenemos la incineración de residuos combustibles siempre que se realice en condiciones muy controladas.

Tiene también desventajas y/o desafíos por delante, a saber: debe haber una coincidencia entre el momento y la oportunidad de realizar el intercambio; se necesita innovación productiva y un mercado para vender productos realizados con residuos como materia prima; también hacen falta bases de datos y redes de proveedores y compradores, además de los cambios de mentalidad ya mencionados.

Como resumen, hay tres elementos básicos en un sistema de EI:

- 1) Que mire a la industria con visión global, sistémica e imitando el funcionamiento de los ecosistemas naturales.
- 2) Que se cree una red dinámica de entidades o empresas relacionadas con su entorno.
- 3) Que se enfoque hacia el DS e incluya aspectos sociales, económicos y ambientales.

4.2. Parques ecoindustriales

Son comunidades de negocios que cooperan entre sí y con la comunidad local para compartir recursos eficientemente y así conseguir ganancias económicas, mejoras en la calidad ambiental y desarrollo en los recursos humanos involucrados.

Es importante diferenciar los términos utilizados:

- Parque ecoindustrial: grupo de empresas o parque industrial que cooperan en un área determinada con los objetivos de la EI, y donde las empresas utilizan residuos de algunas de ellas como materia prima de otras (Pinzón Latorre:156; Loayza Pérez, Silva Meza:110).
- Ecosistema industrial o red ecoindustrial: área más amplia donde se coopera con los objetivos de la EI y que puede extenderse a regiones, incluso a países. Es decir que incluye por lo menos a la comunidad que la rodea.
- Ecoparque: grupo de empresas que promueve el cuidado del medioambiente e incluso tecnologías de producción más limpia, pero que no incluye la simbiosis industrial como método. También puede denominar a un grupo de empresas de reciclamiento que se instalan juntas en una zona pero que no intercambian entre ellas, sino que únicamente reciclan materiales que otras empresas les proporcionan. En estos dos casos no podemos hablar de sistemas de EI, ya que no incluyen la creación de una red de intercambio con utilización de residuos de unas empresas como materia prima de otras.

4.3. Experiencias. El caso de Kalundborg

Las experiencias comenzaron en Kalundborg, Dinamarca, hace 35 años, con un proyecto que se convirtió no solo en pionero sino en modelo mundial, y aún hoy sigue vigente. Luego las experiencias se extendieron a EE. UU., Canadá, y más adelante Asia y Australia.

A estos desarrollos contribuyeron: la aparición de la primera revista de EI, congresos, institutos, estudios específicos en universidades, políticas de gobierno, desarrollo de proyectos, apoyo económico internacional y asociaciones de empresas, investigadores y gobierno.

Surgió de casualidad alrededor de 1970 cuando las industrias buscaron cumplir con requerimientos ambientales legales a la vez que buscaban mejorar la gestión de los residuos y disminuir el consumo de agua (Cervantes Torre-Marín et ál., 2009:66).

Los resultados fueron tan positivos que fundaron el *National Industrial Symbiosis Program NISP*, en los '90, para apoyar el proyecto y fortalecerlo (Cervantes Torre-Marín et ál., 2009:67). Hoy son consultados por todo el mundo puesto que se convirtieron en el ejemplo más emblemático.

Se pueden encontrar representaciones gráficas diferentes de Kalundborg, debido a que el sistema está en continuo cambio, se agregan más industrias y se buscan nuevos rulos y ciclos, nuevos intercambios. Se sugiere visitar las páginas web citadas en Sitios de interés, sus animaciones gráficas permitirán comprender la mecánica de las interacciones entre las diferentes industrias. También están disponibles videos en Youtube.

La ciudad forma parte del sistema, recibe calefacción, asegura puestos de trabajo y se beneficia con la disminución de los impactos ambientales; esta interdependencia junto con la organización de sus industrias, hace que la ciudad sea capaz de adaptarse ante eventuales cambios climáticos y de mantener su economía estable.

El parque ecoindustrial está organizado como una cadena alimenticia, donde existen productores primarios, consumidores y descomponedores, y donde las industrias que lo componen poseen la diversidad necesaria para actuar bajo la EI y realizar intercambios de materia y energía (Pinzón Latorre:156–160).

Algunos de estos intercambios son: entre la planta de energía eléctrica ANSAES y la refinería de petróleo, una le da vapor a la otra y recibe gas y agua de enfriamiento, y ambas, proveedoras de energía, dan calor a los hogares de la ciudad, invernaderos y a la granja de cría de peces; el azufre de la refinería va a la planta de ácido sulfúrico Kemira; la industria de paneles de yeso consume el sulfato de calcio que le sobra a la planta eléctrica y gas de la refinería, y las granjas consumen lodos biológicos residuales como fertilizante.

CONCLUSIONES

A modo de resumen, podemos decir que las Industrias verdes:

- Son procesos productivos que potencian el aprovechamiento de los materiales y la energía, minimizando o eliminando la generación de residuos, y disminuyendo así los riesgos para las personas.
- Aplican los 12 principios de la Ingeniería verde.
- Se basan en el Desarrollo sustentable con el objetivo puesto en la calidad de vida a través del manejo racional de los recursos naturales, con bases éticas y de equidad.
- Tienen en cuenta el ciclo de vida del producto, son inherentemente seguras desde el diseño, y aplican un enfoque sistémico.

Las industrias comenzaron la aplicación de los principios de QV e IV con un motivo principalmente de costos, pero inmediatamente los beneficios se extendieron a lo social y medioambiental. Lo mismo ocurre con la EI; por ejemplo, Kalundborg ha disminuido sus emisiones de GEI en más de 200 000 toneladas anuales de CO₂, y ha logrado un ahorro de 80 000 000 de euros anuales.

Trabajar de esta manera supone ventajas (UNIDO, 2011:17–22):

- económicas: al optimizar los consumos de materias primas, agua y energía; en la prevención de riesgos a la salud y accidentes laborales; y fundamentalmente en la minimización de la generación de residuos y contaminación que evita tratamientos y disposición final de los mismos.
- técnicas: al fomentar investigación y desarrollos tecnológicos se aumenta la eficiencia del proceso productivo y transforma la industria en una más competitiva en el mercado.
- sociales: a través de la generación de empleos, el cuidado de la salud y de la calidad medioambiental, y de la producción de productos seguros, no tóxicos.
- medioambientales: al evitarse la contaminación y generación de residuos; al disminuir impactos; al generar productos con responsabilidad empresarial y no persistentes en el medioambiente.

Respecto de esto último, la generación de empleo se produce por la reconversión industrial hacia procesos productivos más sostenibles, con la aplicación de los 12 principios de IV y por la creación de nuevas industrias de servicios que acompañen y den soluciones a las industrias ya instaladas. Este último es el caso de las industrias del reciclado, las de generación de equipamiento para la gestión de residuos, o las de implementación de equipos de energías renovables, por citar algunos ejemplos. Desde la *Green Industry Platform* se representa estas dos oportunidades en la Figura 4.1.

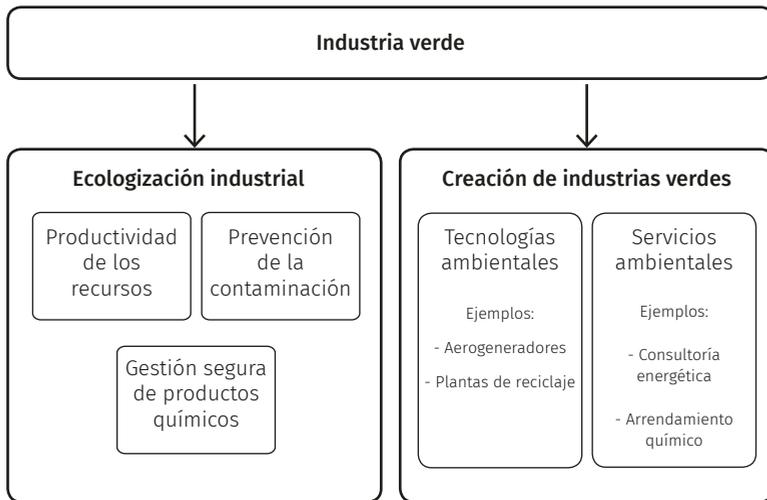


FIGURA 4.1. INDUSTRIA VERDE: UNA ESTRATEGIA EN DOS FRENTE

Fuente: elaboración propia, adaptada de UNIDO, 2011

Por otra parte, esta nueva modalidad de hacer negocios implica un desafío para los futuros profesionales por la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías que sirvan a estos consorcios de industrias. Implica una adaptación a las nuevas necesidades industriales, la capacidad de trabajar en equipos multidisciplinarios y de encontrar alternativas tecnológica y socialmente apropiadas (García–Serna et ál.:25; Loayza Pérez, Silva Meza:117).

Referencias bibliográficas

- ANASTAS, P.; ZIMMERMAN, J.** (2003). Design through the Twelve Principles of Green Engineering. *Env. Sci. and Tech.*, 37(5), 94A–101A.
- CERVANTES TORRE–MARÍN, G.; SOSA GRANADOS, R.; RODRÍGUEZ HERRERA, G.; ROBLES MARTÍNEZ, F.** (2009). Ecología industrial y Desarrollo sustentable. *Ingeniería*, 13(1), 63–70.
- CERVANTES TORRE–MARÍN, G.** (2011). Ecología industrial: innovación y desarrollo en sistemas industriales. *Revista internacional de Sostenibilidad, tecnología y humanismo*, 6(8), 58–78. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2099/11914>
- GARCÍA–SERNA, J.; PÉREZ–BARRIGÓN, L.; COCERO, M.** (2007). New Trends for Design towards Sustainability in Chemical Engineering: Green Engineering. *Chemical Engineering: J*, 133(1–3), 7–30.
- GÓMEZ CÍVICOS, J.** (2008). Ingeniería Verde: doce principios para la Sostenibilidad. *Ingeniería Química* (458), 168–175. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/282329942_Gomez_Civicos_J_I_Ingenieria_Verde_Doce_principios_para_la_Sostenibilidad_Ingenieria_Quimica_458_168-175_2008
- LOAYZA PÉREZ, J.; SILVA MEZA, V.** (2013). Los procesos industriales sostenibles y su contribución en la prevención de problemas ambientales. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*, 16(1), 108–117. Recuperado de http://sisbib.unmsm.edu.pe/Bibvirtual/publicaciones/indata/v16_n1/pdf/a13v16n1.pdf
- MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M.; ZIMMERMAN, Z.** (2003). Applying the Principles of Green Engineering to cradle-to-cradle design. *Environmental Science & Technology, American Chemical Society*, 434–441.
- PINZÓN LATORRE, M.** (2009). La simbiosis industrial en Kalundborg, Dinamarca. *DEARQ-Revista de Arquitectura/Journal of Architecture* (4), 155–161. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/3416/341630313019.pdf>
- ROSEMBERG, A.** (2006). *Ecología y Simbiosis Industrial*. Recuperado de <http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=1234>
- UNIDO** (2008). Introducción a la Producción más Limpia. Capítulo 1 de *Manual de Producción más Limpia*. Viena: Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. Recuperado de https://www.unido.org/sites/default/files/2008-06/1-Textbook_0.pdf

- UNIDO** (2011). Unido Green Industry initiative for Sustainable Industrial Development. Recuperado de http://www.greengrowthknowledge.org/sites/default/files/downloads/resource/Green_Industry_Initiative_for_Sustainable_Development_UNIDO.pdf; <https://open.unido.org/api/documents/4784104/download/Unido%20Green%20Industry%20Initiative%20for%20Sustainable%20Industrial%20Development>
- ZULUAGA, F.** (2013). Algunas aplicaciones del ácido poli-L-láctico. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 37(142), 125–142.

Sitios de interés

- AMERICAN CHEMICAL SOCIETY ACS.** <https://www.acs.org>
- ARSOL ARGENTINA, PROGRAMA PROSUMIDORES.** <https://www.arsol.com.ar/web/index.html>
- CENTRO DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA NICARAGUA.** <https://www.pml.org.ni/index.php/produccion-limpia>
- DANSK SIMBIOSECENTER.** <https://symbiosecenter.dk/en/>
- GREEN GROWTH KNOWLEDGE PLATFORM.** <http://www.greengrowthknowledge.org/>
- NATIONAL INDUSTRY SIMBIOSIS PROGRAM.** <http://www.nispnetwork.com/>
- YACUZZI, E. ET ÁL.** (2013). Aplicaciones del Just-in-Time en la Argentina. Recuperado de <https://ucema.edu.ar/publicaciones/download/documentos/509.pdf>

Sobre la autora

ANA LAURA PINO. Licenciada en Química (Universidad Nacional del Litoral). Magíster en Ciencias de la madera, celulosa y papel (UNAM). Especialista en Gestión Ambiental (UNL). Docente de Química verde, Gestión Integral de Residuos y Microbiología ambiental. Expositora en charlas sobre Química verde e Ingeniería verde. Lleva a cabo acciones de extensión, investigación y asesoramiento en temas ambientales. Coordinadora de actividades de concientización ambiental. Autora de publicaciones sobre residuos sólidos urbanos y procesos productivos sostenibles. Directora de prácticas extracurriculares en Química Verde. Responsable de las Áreas de Seguridad, Salud Laboral y Gestión Ambiental; y Formación profesional y Educación continuada (FIQ, UNL). Miembro del Programa Ambiente y Sociedad (UNL). Consultora externa del Ministerio de Ciencia y Tecnología, y del Ministerio de Producción de la provincia de Santa Fe.