



# Fundamentos de la química verde

**P**ara nuestra sociedad moderna la idea de un mundo enlazado es relativamente nueva. En este sentido, hace poco tiempo que tenemos el concepto de una gran trama de interconexiones en las que las acciones de los seres humanos afectan directamente a los ecosistemas, incluso de manera global.

No obstante, las ideas de cuidar el planeta en el que vivimos y la integración del ser humano con su entorno natural no son nuevas. En la historia existen grandes ejemplos del entendimiento que poseían los pueblos antiguos sobre la interrelación que tenía el hombre con su medio.





# Green chemistry fundamentals

**F**or our modern society, the idea of a linked world is relatively new. In this regard, we recently have the concept of a large web of interconnections, in which human actions directly affect the ecosystems, even globally.

However, the ideas of caring for the planet on which we live and the human integration with the natural environment are not new. Throughout history there are great examples of the understanding that ancient peoples possessed about the inter relation between man and his environment.



Como un ejemplo de este conocimiento podemos encontrar la respuesta atribuida al Jefe Seattle sobre la propuesta de compra de sus tierras en 1854, en la cual es posible percibir el choque de dos formas de ver el mundo, la de los pobladores originales de América contra la de los occidentales.

*Es evidente que el hombre blanco no entiende nuestra manera de ser. Os es indiferente una tierra que otra porque no la ve como a una hermana, sino como a una enemiga. Cuando ya la ha hecho suya, la desprecia y la abandona.*

*Deja atrás la tumba de sus padres sin importarle. Saquea la tierra de sus hijos y le es indiferente. Trata a su madre -la Tierra- y a su hermano -el firmamento- como a objetos que se compran, se usan y se venden como ovejas o cuentas de colores. Hambriento, el hombre blanco acabará tragándose la tierra*

En los pasajes del Popol-Vuh se puede observar cómo los antiguos pobladores de América tenían una comprensión integral de la humanidad con su entorno, esta visión les permitía creer que el maíz, su principal alimento, era el mismo material del que estaban hechos:

*Se juntaron los Creadores, llegaron y celebraron consejo en la oscuridad y en la noche; luego buscaron y discutieron, y aquí reflexionaron y pensaron. De esta manera salieron a luz claramente sus decisiones y encontraron y descubrieron lo que debía entrar en la carne del hombre...*

*Y así encontraron la comida y ésta fue la que entró en la carne del hombre creado, del hombre formado; ésta fue su sangre, de ésta se hizo la sangre del hombre. Así entró el maíz [en la formación del hombre] por obra de los Progenitores...*

En cambio, nuestra sociedad se fundamenta en la búsqueda del progreso; es decir, en lugar de un pensamiento cíclico dependiente de los procesos naturales, siempre nos encontramos en la búsqueda continua de un futuro mejor, en donde el motor del cambio es el perfeccionamiento.

Aunque esta idea de “un futuro siempre mejor” nos ha llevado a alcanzar grandes logros tecnológicos, también ha creado condiciones de desequilibrio, las cuales afectan directamente a nuestros ecosistemas y por ende, al ser parte de ella, a la misma humanidad.

En este marco de perfeccionamiento tecnológico nace la química moderna, la cual ha producido grandes beneficios para la humanidad, de la misma manera que otras áreas de la ciencia y de la tecnología. Sin embargo, al mismo tiempo ha creado desequilibrios tan grandes que en la actualidad pueden ser registrados incluso de manera global, como los gases de efecto invernadero (GEI) y los Clorofluorocarburos

As an example of this knowledge, we can find the answer attributed to the great Chief Seattle to the proposed purchase of his lands in 1854, in which it is possible to perceive the clash of two ways of seeing the world, that of the original settlers of America against that of the Western world.

*We know that the white man does not understand our ways. One portion of land is the same to him as the next, for he is a stranger who comes in the night and takes from the land whatever he needs. The earth is not his brother, but his enemy, and when he has conquered it, he moves on.*

*He leaves his father's grave behind, and he does not care. He kidnaps the earth from his children, and he does not care. His father's grave, and his children's birthright are forgotten. He treats his mother, the earth, and his brother, the sky, as things to be bought, plundered, sold like sheep or bright beads. His appetite will devour the earth and leave behind only a desert.*

In some passages of the Popol Vuh book, it can be seen how the ancient people in America had a comprehensive understanding of humanity with its environment, this view allowed them to believe that corn, their main food, was the same material, they were made of:

*The Creators gathered, came and held a council in the dark, at night, after they sought and discussed, and reflected and thought. In this way, their decisions emerged and found and discovered what was to get into the flesh of men...*

*And they found food and this food went into the flesh of the man created, and it was his blood, and from this blood, the man's blood was created. This was the way in which corn entered [in the formation of man] by the Parents' work...*

By contrast, our society is based on the pursuit of progress, that is, instead of a cyclical thought pending on natural processes, we are always in constant search of a better future, where improvement is the engine of change.

While this idea of “always a better future” has led us to achieve great technological achievements, it has also created imbalance conditions that affect directly our ecosystems and hence as part of it, to humanity itself.

In this context of technological sophistication, modern Chemistry is born, which has produced great benefits for humanity, in the same way as other areas of science and technology. However, at the same time has created such big imbalances that today can be registered even overall, just as greenhouse gases (GHG) and chlorofluorocarbons (CFC), responsible for global warming and the hole in the ozone layer, respectively.



(CFC), responsables del calentamiento global y del hoyo en la capa de Ozono, respectivamente.

Tuvieron que pasar más de dos siglos para que la química moderna replanteara sus fundamentos y ampliara su visión, en búsqueda de nuevas formas de hacer transformaciones que tomaran en cuenta no sólo los productos o la eficiencia de las reacciones, sino que fueran vistas, como cualquier actividad humana, de manera integral con el medioambiente, en tanto que dependen y afectan al entorno natural. Es en esta búsqueda de un entendimiento holístico que surgen los fundamentos de la química verde.

### **Inicios de la química verde**

Los inicios de la química verde se remontan a los años 60, década en la que en los Estados Unidos de América (EUA) y en Europa se iniciaron los grandes movimientos activistas; en el año de 1962 se edita por primera vez “Primavera silenciosa” de Rachel Carson, la primera publicación de divulgación de impacto ambiental. En este libro se discuten los efectos del DDT en el medioambiente.

It took more than two centuries, for modern Chemistry to recast its foundations and expand its vision, seeking new ways to make transformations, taking into account not only the efficiency of reactions, but to show them as any human activity, in a comprehensive way with the environment, since they depend and affect the natural environment. It is in this search for a holistic understanding, that the fundamentals of Green Chemistry arise.

### **Beginnings of Green Chemistry**

The beginnings of Green Chemistry go back to the '60s, a decade in which the United States of America (USA) and Europe began great activist's movements, in the year of 1962, “Silent Spring” by Rachel Carson is published for the first time. This is the first publication to disclose environmental impact. This book discusses the effects of DDT on the environment.

The publication, written in a clear language, the natural rigor of the best scientific analysis and shocking examples, managed to arouse the society regarding pollution and environmental impact, despite the strong criticism, especially from the scientific community.

La publicación, escrita con un lenguaje transparente, el rigor propio del mejor análisis científico y ejemplos estremecedores, logró despertar la preocupación de la sociedad en temas de contaminación e impacto ambiental a pesar de haber recibido fuertes críticas, en especial por parte de la comunidad científica. Estas inquietudes llevaron en 1970, casi una década después, a la fundación de la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos.

En 1980 la EPA, reconociendo la necesidad de establecer soluciones de fin de tubo, establece la Oficina de Prevención de la Contaminación y Sustancias Tóxicas (OPPT por sus siglas en inglés). Para 1990, se publica la Ley de Prevención de la Contaminación (The Pollution Prevention Act), la cual ayuda a prevenir la generación de contaminantes por medio de controles de ingeniería, control de inventarios, optimización de procesos y sienta las bases de la química verde.

### Los principios de la química verde

Los 12 principios de la química verde, publicados originalmente por Paul Anastas y John Warner en el libro *Green Chemistry: Theory and Practice* (Oxford University Press, Nueva York, 1998), proporcionan las herramientas básicas para el entendimiento y diseño de la química verde. Ésta, en su máxima expresión, busca producir “cero impactos” sociales y ambientales.

Los 12 principios expresados en su manera original por Anastas y Warner son:

#### 1. Prevención

Es mejor no producir ningún desperdicio, que tratar o limpiar una vez que éste ha sido creado.

En la química tradicional los principales objetivos son el producto y la eficiencia de la reacción; en general la producción de desechos, independientemente de su toxicidad, no eran tomados en cuenta ni en el diseño de reacciones ni en su escalamiento.

Por muchos años el tratamiento de desechos se basó en la máxima de que “la solución a la contaminación es la dilución”. Lo que en resumidas cuentas quiere decir que es posible tirar todo lo que haga falta, ya que la capacidad de carga de los ecosistemas es ilimitada.

Esta idea de un mundo de dimensiones infinitas no puede ser más errónea. Si bien es verdad que los ecosistemas tienen cierta tolerancia a los contaminantes, dicha capacidad de carga es finita y depende de diferentes factores como la toxicidad del contaminante, la cantidad descargada, su tiempo de residencia, la dinámica de ecosistemas, entre otros.

Dentro de los desechos químicos que se han vertido al medio ambiente es posible encontrar prácticamente toda la gama de toxicidades, desde los altamente letales como el Cianuro o Isocianato de Metilo, hasta gases prácticamente inocuos como el Nitrógeno molecular o

These concerns led in 1970, almost a decade later, to the founding of the United States Environmental Protection Agency EPA .

In 1980 the EPA, recognizing the need for end-of-pipe solutions, established the Office of Pollution Prevention and Toxics OPPT . By 1990, The Pollution Prevention Act is published, which helps to prevent pollutant generation through engineering controls, inventory control, process optimization and provides the basis of Green Chemistry.

### The principles of Green Chemistry

The 12 principles of Green Chemistry, originally published by Paul Anastas and John Warner in the book: *Green Chemistry: Theory and Practice* (Oxford University Press, New York, 1998), provide the basic tools to design and understand Green Chemistry. That, at its best, aims to produce “zero social and environmental impact”.

The 12 principles expressed in the original way by Anastas and Warner are:

#### 1. Prevention

It's better to prevent waste than to treat or clean up waste afterwards.

In traditional Chemistry, the major objectives are the product and reaction efficiency, overall waste production, regardless of toxicity, were not taken into account either in the reactions design or scaling.

For many years waste treatment was based on the maxim that “the solution to pollution is dilution”, which in short means that you can throw everything necessary, because the load capacity of the ecosystems is unlimited.

This idea of a world of infinite dimensions could not be more wrong. Although it is true that ecosystems have some tolerance to contaminants, this capacity is finite and depends on various factors such as pollutant toxicity, the amount downloaded, time of residence, ecosystems dynamics, among others.

Within the chemical waste that has been dumped into the environment, it is possible to find almost the entire range of toxicities, from highly lethal as cyanide or methyl isocyanate, to virtually harmless gases such as molecular nitrogen or CO<sub>2</sub>. Ironically, the biggest challenge that our society faces is the high concentrations of Carbon Dioxide in the atmosphere, being that this is a practically inert gas present in all respiration and photosynthesis processes. However, in the year 2007 the Environmental Protection Agency reported that the U.S., only in this country, 95 million pounds (about 43,000 tons) of hazardous chemical products were discarded directly to the environment.

According to the principle of prevention, Green Chemistry drives the design of reactions that produce no harmful waste. This is a difference with Environmental Chemistry, which postulates that toxic wastes must



el CO<sub>2</sub>. Resulta irónico que el mayor reto que enfrenta nuestra sociedad sea las altas concentraciones de Dióxido de Carbono en la atmósfera, siendo que éste es un gas prácticamente inerte, presente en todos los procesos de respiración y fotosíntesis. No obstante, en el año de 2007 la Agencia para la Protección del Medio Ambiente de los EUA reportó que, sólo en ese país, se desecharon 95 millones de libras (unas 43 mil toneladas) de productos químicos peligrosos directamente al entorno.

En el principio de la prevención, la química verde impulsa el diseño de reacciones que no produzcan ningún tipo de desechos nocivos. Esta es una diferencia con la química ambiental, que postula que los residuos tóxicos tienen que ser tratados antes de ser vertidos; bajo el nuevo enfoque se busca la solución a los desechos desde su origen: la producción.

## 2. La economía de átomos

Los métodos de síntesis deben diseñarse de manera que todos los materiales usados durante el proceso se incorporen al máximo en el producto final, con esto se minimiza la formación de subproductos.

La química tradicional se basa principalmente en el balance estequiométrico de las reacciones, es decir, considera las proporciones cuantitativas o relaciones de masa en la que los elementos participan en ella, a partir de estas relaciones se calculan los rendimientos teóricos y porcentuales.

Los rendimientos teóricos se determinan a partir de la relación estequiométrica entre el producto deseado y el reactivo limitante (compuesto que una vez agotado detiene la reacción), este parámetro nos proporciona la cantidad máxima teórica de producto químico que se puede obtener a partir de una reacción.

En la práctica, en pocas ocasiones se alcanza el 100% de rendimiento, por lo que se hace necesario calcular un valor que exprese la productividad real: el rendimiento porcentual, el cual es el cociente del rendimiento real entre el teórico. A partir de los rendimientos teórico y porcentual, es que se ha diseñado prácticamente toda la química de los últimos dos siglos y medio.

Como podemos observar, esta forma de hacer química sólo toma en cuenta el reactivo limitante y el producto deseado, los otros componentes de la reacción no son cuantificados para los cálculos de rendimientos. Esto tiene la desventaja de producir una gran cantidad

be treated before being discharged, under the new approach the aim is to solve wastes at the origin: i.e. when they are produced.

## 2. Atom Economy

Design synthetic methods to maximize the incorporation of all materials used in the process into the final product.

Traditional Chemistry is based primarily on stoichiometric balance of reactions, i.e. considers the quantitative proportions or mass ratios, at which the elements involved in it, from these ratios, the theoretical yields and percentages are calculated.

The theoretical yields are determined from the stoichiometric ratio between the desired product and the limiting reagent (compound once quenched, stops the reaction), this parameter provides the maximum amount of chemical that can be obtained from a reaction.

In practice, it rarely reaches 100% yield, therefore it is necessary to calculate a value that expresses the actual productivity: the percentage yield, which is the ratio between the real and the theoretical performance. The theoretical and percentage yields are the basis, from which almost the whole chemistry of the past two and a half centuries has been designed.

As we can see, this way of doing Chemistry only considers the limiting reactive and the desired product, the other reaction components are not quantified for yield calculations.

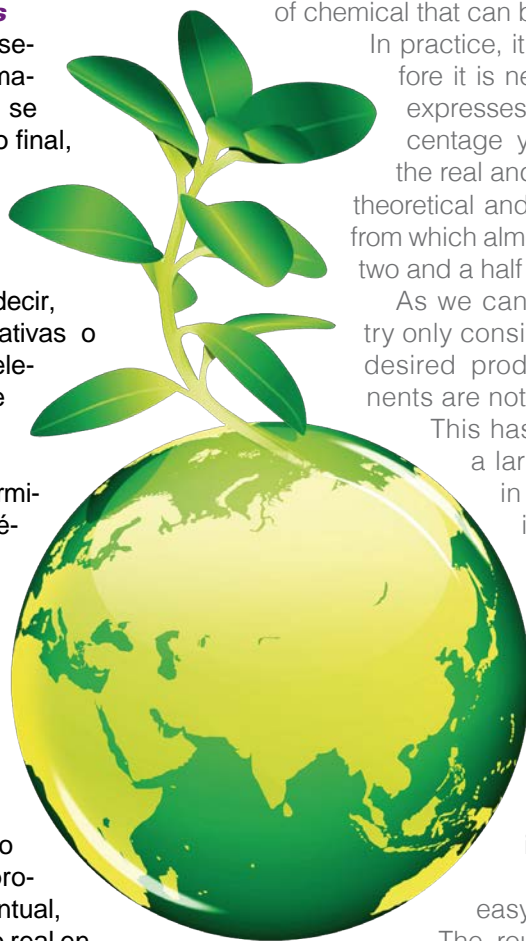
This has the disadvantage of producing a large amount of by-products, even in theoretically efficient reactions, i.e. greater than 90%.

The solution of Green Chemistry to by-products and waste is the atom economy, which is based on the connections between atoms of the desired product and all the reagents. That is, a 100% efficiency of atoms economy indicates that all the reagents atoms were incorporated into the product.

This new form of reactions is not easy and requires a paradigm shift. The routes to the atoms economy can be: bio catalysis, organ metallic reactions with catalysts involved, and micro reactors, among others.

## 3. Less Hazardous Chemical Syntheses

Design synthetic methods to use and generate substances that minimize toxicity to human health and the environment.



de subproductos, aun en reacciones teóricamente eficientes, es decir, mayor al 90%.

La solución de la química verde a los subproductos y desperdicios es la economía de átomos, la cual se basa en establecer la relación entre los átomos del producto deseado y todo los de los reactivos. Es decir, una eficiencia del 100% en la economía de átomos indicaría que todos los átomos de los reactivos fueron incorporados al producto.

Esta nueva forma de hacer reacciones no es fácil y requiere de un cambio de paradigma. Las vías para la economía de átomos pueden ser: la biocatálisis, las reacciones organometálicas con los catalizadores implicados, los microreactores, entre otros.

### 3. Diseñar síntesis menos peligrosas

Diseñar métodos de síntesis que usen y generen sustancias con toxicidad baja o nula al medio ambiente y a los seres humanos.

Las principales materias primas para las síntesis químicas -sobre todo las orgánicas- se hacen tradicionalmente a partir de derivados del petróleo, los cuales pueden ser tóxicos, por ejemplo el Fenol o Benceno.

En la química verde se propone el cambio a materias primas de toxicidad baja o nula. Un ejemplo de esto es el cambio a síntesis que usan los azúcares en lugar de los compuestos orgánicos tradicionales como el Benceno. Las biosíntesis que utilizan la biomasa son alternativas viables para el uso de este tipo de reactivos.

### 4. Diseñar productos químicos más seguros

Se deben diseñar productos químicos que cumplan con la función deseada y al mismo tiempo con una toxicidad mínima o nula.

En el diseño clásico de productos se busca sintetizar un compuesto que ofrezca la máxima cualidad para una función deseada, como tensión superficial, resistencia a la abrasión, a la alta temperatura, o la oxidación, etc. En muchas ocasiones, este objetivo se persigue sin tomar en cuenta la toxicidad del compuesto producido. En la química verde se busca siempre diseñar una alternativa no tóxica para la elaboración de productos.

Un hito en el cambio de productos químicos que producen impactos ambientales ha sido la sustitución de los Clorofluorocarburos (CFC) por opciones menos agresivas al ambiente. Estos gases sintetizados con el objetivo de producir compuestos inertes para ser utilizados principalmente en refrigeración son los responsables de la disminución en la capa de Ozono.

Debido al impacto de los CFC a la atmósfera se proclamó en 1987 el Protocolo de Montreal, en el que 180 naciones, incluida la nuestra, se comprometieron a reducir la producción de estos gases, además de los Ha-

The main raw materials for chemical synthesis, - especially organics - are traditionally made from petroleum, which could be toxic, such as phenol or benzene.

Green Chemistry aims to change to low or even no toxicity materials. An example is the synthesis shift to sugars instead of traditional organic compounds such as benzene. The biosyntheses using biomass are viable alternatives to the use of such reagents.

### 4. Designing Safer Chemicals

Design chemical products to affect their desired function while minimizing their toxicity.

In the classical design of products, the objective is to synthesize a compound that provides the maximum quality for a desired function, such as surface tension, abrasion, high temperature, or oxidation resistance, etc. In many instances, this objective is pursued regardless of the toxicity produced by the compound. Green Chemistry seeks to design a non toxic alternative for product development.

A milestone in the change of chemicals that produce environmental impacts has been the replacement of chlorofluorocarbons (CFCs) by less aggressive environmental options. These gases synthesized with the aim of producing inert compounds to be used mainly in refrigeration are responsible for the decrease in the ozone layer.

Due to the impact of the CFCs into the atmosphere, in 1987 the Montreal Protocol was proclaimed, in which 180 nations, including ours, committed to reduce the production of these gases, as well as Halons and Methyl Bromide, also responsible for the thinning of the ozone layer.

Today the preparation of ozone-friendly products is widespread, below we give some examples of CFC alternatives in each sector:

#### I. Refrigeration Sector

##### a) New refrigeration units

The alternatives are HFC-134a, hydrocarbons, HFC mixtures, mixtures of HCFC, HCFC-22, and Ammonia.

##### b) Air conditioning unit's air cooled

HFC-134a, HFC mixtures.

##### c) Cooling equipment

Mixtures of HFC, HCFC and HFC.

##### d) Mobile Air Conditioners

Mixtures of HCFC, HFC-134a.

#### II. Foam sector

Carbon dioxide, hydrocarbons, HFC-152a or HFC-134a. In some markets the HCFCs are used for rigid foams for thermal insulation.

#### III. Aerosols

Hydrocarbons such as propane, butane and isobutene, HCFCs, Dimethyl, Ether and Perfluoroethers. Other ozone friendly products without CFC are hand pump nebulizers and dry powder inhalers (DPIs).

lonos y Bromuro de Metilo, responsables también del adelgazamiento de la capa de Ozono.

Actualmente está ampliamente extendida la elaboración de productos inocuos para el Ozono, a continuación damos cuenta de algunos ejemplos de las alternativas a los CFC de cada sector:

#### **I. Sector de la refrigeración**

##### **a) Nuevas unidades de refrigeración**

Las alternativas son HFC-134a, hidrocarburos, mezclas de HFC, mezclas de HCFC, HCFC-22, Amoníaco.

##### **b) Unidades de acondicionamiento de aire enfriadas por aire**

HFC-134a, mezclas de HFC.

##### **c) Equipo de enfriamiento**

Mezclas de HFC, HCFC y HFC.

##### **d) Acondicionadores de aire móviles**

Mezclas de HCFC, HFC-134a.

#### **II. Sector de espumas**

Dióxido de Carbono, hidrocarburos, HFC-152a o HFC-134a. En algunos mercados los HCFC se utilizan para espumas rígidas de aislamiento térmico.

#### **III. Aerosoles**

Hidrocarburos tales como Propano, Butano y el Iso-Butano, los HCFC, el Dimetilo, el Éter y los Perfluoro-léters. Otros productos inocuos para el Ozono que no contienen CFC son los nebulizadores de bombas manuales y los inhaladores de polvo seco.

#### **IV. Esterilizantes**

Entre las alternativas figuran el Óxido de Etileno al 100%, mezclas de Óxido de Etileno/Dióxido de Carbono, esterilización y Formaldeído. En algunos esterilizantes se utilizan HCFC.

#### **V. Tetracloruro de Carbono como disolvente**

En los países en desarrollo se ha utilizado el Tetracloruro de Carbono como disolvente, pero actualmente se cuenta con muchas opciones como alternativas. Entre ellas figuran disolventes orgánicos tales como los alcoholes, las ketonas, los éteres y disolventes clorados tales como el Per-Cloroetileno. Cada una de estas alternativas presenta sus propias ventajas y desventajas.

#### **VI. Sector de extinción de incendios**

La opción de productos para sistemas de lucha contra incendios depende de las circunstancias. Los halones se consideran necesarios solamente en unos pocos casos como las salas de control o las aeronaves. Algunas alternativas usan Dióxido de Carbono o polvo seco. También hay nuevos sistemas como las tecnologías de nebulización de agua y aerosoles generados mediante combustión. Adicionalmente se pueden gestionar los equipos que ya contienen halones para utilizarlos sólo donde es indispensable, lo que representaría un inventario disponible.

#### **VII. Sector de los disolventes**

Alternativas para el CFC-113 y Metilcloroformo.

Tecnologías sin proceso de limpieza, limpieza acuosa y semiacuosa, hidrocarburos, disolventes clorados

#### **IV. Sanitizers**

Alternatives include Ethylene Oxide 100%, Ethylene Oxide and Carbon Dioxide mixtures, sterilization and formaldehyde. In some sanitizers, HCFCs are used.

#### **V. Carbon Tetrachloride as Solvent**

In developing countries, carbon tetrachloride has been used as solvent, but now there are many options as alternatives. These include organic solvents such as alcohols, ketones, ethers and chlorinated solvents such as Per-chlorethylene. Each of these alternatives has its own advantages and disadvantages.

#### **VI. Fire fighting Sector**

The choice of products for fire fighting systems depends on the circumstances. Halons are considered necessary only in few cases, such as control rooms or aircraft. Some alternatives use Carbon Dioxide or dry powder. There are also new systems as water mist technologies and aerosols generated by combustion. Additionally you can deal with equipments containing halons to be used only where necessary, which would represent an available inventory.

#### **VII. Solvents industry**

Alternatives for CFC-113 and Methyl chloroform.

Technologies without cleaning process, aqueous and semi-aqueous cleaning, hydrocarbons, chlorinated solvents that do not deplete the ozone layer, HCFCs, Perfluorocarbons and non-solvent cleaning processes.

#### **VIII. Soil fumigation**

Among the alternatives to Methyl Bromide, we can mention different processes such as, steam, biological control, crop rotation, landless farming and others, as well as chemicals such as Chloropicrin, Metham Sodium, Dazomet, and others.

The Montreal Protocol is a clear example of a global initiative to substitute products that meet specific required functions without affecting the environment or human health, or at least with less impact - in counterpart to those traditionally used.

#### **5. Safer solvents and auxiliaries**

Minimize the use of auxiliary substances wherever possible make them innocuous when used.

In the classic production processes, solvents and auxiliary reaction as catalysts, coagulants, flocculants, etc. were not taken into account to determine the toxicity of the products. Reactions were designed in such a way that once the reaction finished, the solvents and auxiliaries should be easily removed for reuse or disposal, in many cases directly to the environment.

A typical example of the use of toxic solvents is in the coating industry, which for many years used organic solvents such as aliphatic hydrocarbons, aromatic hydrocarbons derived from Benzene, mainly Toluene and Xylene, compounds which are highly carcinogenic agents;



que no agotan la capa de ozono, HCFC, Perfluorocarburos y procesos de limpieza no disolvente.

### VIII. Fumigación de suelos

Entre las alternativas al Metilbromuro figuran procesos tales como la solarización, el vapor, el control biológico, la rotación de cultivos, el cultivo sin tierra y otros, así como productos químicos tales como Cloropicrina, Metham Sodio, Dazomet, y otros.

El protocolo de Montreal es un claro ejemplo de una iniciativa global para la sustitución de productos que cumplen con funciones específicas requeridas, sin que estos afecten al ambiente o a la salud humana -o en todo caso, con un menor impacto-, en contraparte a los que se usaban tradicionalmente.

### 5. Uso de disolventes y auxiliares seguros

En los procesos clásicos de producción, los disolventes y los materiales auxiliares de la reacción como catalizadores, coagulantes, floculantes, etc., no eran tomados en cuenta para determinar la toxicidad de los productos. Las reacciones se diseñaban de tal manera que, una vez terminada la reacción, los disolventes y los auxiliares deberían ser removidos fácilmente para su reutilización o desecho, en muchos de los casos directamente al medio ambiente.

Un ejemplo típico del uso de disolventes tóxicos se encuentra en la industria de los recubrimientos, los cuales por muchos años utilizaron disolventes orgánicos como los hidrocarburos alifáticos; hidrocarburos aromáticos derivados del Benceno, principalmente Xileno y Tolueno, compuestos que son altamente cancerígenos; alcoholes, sobre todo Butanol e Isopropanol; cetonas, particularmente Metil-Isobutil-Cetona y Metil-Etil-Cetona; ésteres. Algunos disolventes como el thinner son mezcla de estos compuestos.

Una solución parcial a los compuestos orgánicos son los recubrimientos base agua, los cuales, como su nombre lo indica, utilizan como disolvente principal el agua; sin embargo, todas las pinturas base agua necesitan de un co-disolvente, usualmente éteres de Glicol, en proporciones que van del 10% al 15%. La principal función de dichos co-disolventes es mejorar la aplicación.

En la química moderna los disolventes que se utilizan son agua y aire, o mezclas acuosas altamente diluidas; también se recomienda que los disolventes y auxiliares no sean desechados al medio ambiente, en tanto que su principal valor se encuentra en su reutilización para el mismo proceso.

### 6. Diseñar para una eficiencia energética

Los requerimientos energéticos de los procesos químicos tienen que ser evaluados por sus impactos económicos y ambientales, los cuales deben ser minimiza-

alcohols, especially Butanol and Isopropanol; ketones, particularly Methyl Isobutyl Ketone and Methyl Ethyl Ketone; esters. Some solvents as thinner are a mixture of these compounds.

A partial solution to the organic compounds are waterborne coatings, which, as its name implies, use water as the main solvent, but all water-based paints require a co-solvent, usually Glycol ethers in proportions ranging from 10% to 15%. The main function of these co-solvents is to improve the application.

In modern Chemistry, the solvents used are water and air, or highly diluted aqueous mixtures, it is also recommended that solvents and auxiliary materials not to be discarded into the environment, whereas its main value lies in their reuse for the same process.

### 6. Design for Energy Efficiency

Minimize the energy requirements of chemical processes and conduct synthetic methods at ambient temperature and pressure if possible.

Although the energy wastage of a process is a pollutant, the main problem is in the production of wasted energy, because due to the low efficiency schemes prevalent in the energy production and distribution, every Joule wasted in the process, represents several Joules in the extraction or net generation of energy, with equivalent amount of pollution produced.

In traditional industrial processes, the main source of energy comes from burning hydrocarbons, this source of cheap energy- produced by nature itself over thousands of years by the decomposition of organic material - is finite, besides it produces CO<sub>2</sub> as waste, which is one of the main greenhouse gases.

That is why the new Chemistry suggests the search of chemical reactions requiring little activation energy to be carried out, and preferably at ambient temperature and pressure, these objectives can be achieved with bio - catalysts.

### 7. Use of Renewable Feedstocks

Use renewable raw material or feedstock rather whenever practicable.

From the early nineteenth century, the global industry began with the substitution of natural materials for synthetic ones, as in the case of Cellulose Nitrate (celluloid) and Bakelite, which are used instead of wood and ivory, respectively.

Such substitution of materials is mainly due to the production of polymers, which in the beginning were manufactured from materials of natural origin, such as cotton cellulose, furfural from oat hull, seed oils and starch derivatives. Today the vast majority of polymers base their manufacturing on petroleum derivatives.

Today high-value plastics as Polystyrene, Teflon, Polyethylene Terephthalate (PET), and Low Density

dos. De ser posible los procesos se deben de llevar a cabo a temperatura y presión ambiente.

Aunque el desperdicio de energía de un proceso es un contaminante en sí, el mayor problema está en la producción de la energía desperdiciada, pues debido a los esquemas de baja eficiencia que prevalecen en la producción y distribución de energía, cada Joule desperdiciado en el proceso, representa varios Joules en la extracción o generación neta del energético, con equivalente cantidad de contaminación producida.

En los procesos industriales tradicionales, la principal fuente de energía proviene de la quema de hidrocarburos, esta fuente de energía barata -producida por la propia naturaleza durante miles de años por medio de la descomposición de la materia orgánica- es finita, además produce como desperdicio  $\text{CO}_2$ , que es uno de los principales gases del efecto invernadero.

Es por esto que la nueva química propone la búsqueda de reacciones que requieran poca energía de activación para llevarse a cabo, y preferentemente a temperatura y presión ambiente, estos objetivos se pueden alcanzar con biocatalizadores.

### **7. Uso de materias primas renovables**

Los reactivos y las materias primas deben ser renovables, siempre y cuando esto sea técnica y económicamente viable.

A partir de principios del siglo XIX, la industria mundial comenzó con la sustitución de materiales de origen natural por sintéticos, tal es el caso del Nitrato de Celulosa (celuloide) y la Baquelita, los cuales son utilizados en lugar de madera y marfil, respectivamente.

Esta sustitución de materiales se debe principalmente a la producción de polímeros, los cuales en sus inicios fueron fabricados a partir de materiales de origen natural, como la celulosa del algodón, el furfural de la cáscara de avena, aceites de semillas y derivados del almidón. En la actualidad la gran mayoría de polímeros basa su fabricación en los derivados del petróleo.

Hoy día los plásticos de alto valor de uso como el Poliestireno, el Teflón, el Polietilén Tereftalato (PET), y el Polietileno de Baja Densidad, entre otros, son producidos a partir de materias primas derivadas del petróleo; bajo este esquema, la producción de estos materiales dependerá del abasto de un recurso no renovable.

Es por esto que la química verde propone el uso de materiales renovables para la producción de sustancias; una fuente de materias primas para la producción de estos materiales es la biomasa útil, la cual abarca un amplio conjunto de materias orgánicas que se caracteriza por su heterogeneidad, tanto por su origen como por su naturaleza.

Es a partir de la biomasa que se pueden producir compuestos orgánicos útiles, un ejemplo de sustitutos de fuentes de materias primas se muestra en la Figura 1.

Polyethylene, among others, are produced from petroleum-based raw materials, under this scheme, the production of these materials depend on the supply of a non-renewable resource.

This is why Green Chemistry proposes the use of renewable materials for substance production, a source of raw materials for the production of these materials is the useful biomass, which covers a wide range of organic materials characterized by heterogeneity, both in its origin and nature.

It is from the biomass that useful organic compounds can be produced. An example of raw materials sources substitutes are shown in Figure 1.

Although Green Chemistry proposes the search of sources of renewable materials, its real advantage comes from finding new materials, which are compounds derived from highly organized, compounds as sugars or starches or even proteins, bypassing relatively simple compounds, such as ethylene.

In addition, all these applications must be based on sustainable development, and cannot move the resources basic uses. The search for new materials cannot compete with food and human health, or with healthy ecosystems.

### **8. Reduce Derivatives**

Minimize or avoid unnecessary derivatization if possible, which requires additional reagents and generate waste.

The unnecessary production of derivatives has to be removed or reduced, i.e., groups blockade, protection / lack of protection, and temporal changes of physical and chemical processes to produce a final product; these steps require additional reagents and may produce by-products. Traditional organic Chemistry often uses a large amount of intermediate steps to obtain a final product.

Protection and non-protection reactions are a synthetic strategy which is applied to protect a more reactive functional group compared to others this leads to add two reactions to the synthesis (protection / non - protection), this reduces the reaction yield, increases both the use of other reagents and the possibility of by-product formation (Figures 2 and 3).

Furthermore, in classical Chemistry, different types of physical modifications are used, i.e. going from liquid to gaseous state, or through different systems of compression and expansion.

The ultimate goal of Green Chemistry is to carry out the reaction in a single step and with the same state of aggregation. Often, this can be very complicated, the solution is that the raw materials have a nature similar to that of the reactions products.

An example of this technology is the use of sugars as raw material of intermediate platform or building



Compuesto químico	Fuente alternativa	Industrial o uso final
Olefinas: Etileno o propileno	Fermentación selectiva de la biomasa	Polímeros
Aromáticos: Benceno, Tolueno, Xileno	A partir del Metanol	Polímeros y ciclo hexano

Figura 1. Sustitutos de fuentes de materias primas.

No obstante que la química verde propone una búsqueda de fuentes de materias primas renovables, su verdadera ventaja surge de buscar nuevos materiales, los cuales son obtenidos a partir de compuestos altamente organizados, como azúcares o almidones o incluso proteínas, sin pasar por compuestos relativamente simples, como el Etileno.

Además, todas estas aplicaciones tienen que estar fundamentadas en el desarrollo sustentable, y no pueden desplazar los usos básicos de los recursos. La búsqueda de nuevos materiales no puede competir con la alimentación y salud humana, ni con los ecosistemas sanos.

### 8. Reducción de los derivados

Se tiene que eliminar o reducir la producción innecesaria de derivados, es decir, el bloqueo de grupos, protección/desprotección, y modificaciones temporales de los procesos físicos y químicos para producir un producto final; estos pasos requieren de reactivos adicionales y pueden producir subproductos. En muchas ocasiones la química orgánica tradicional utiliza una gran cantidad de pasos intermedios para lograr obtener un producto final.

Reacciones de protección y desprotección son una estrategia sintética que se aplica para proteger un grupo funcional más reactivo que otro, lo que conlleva agregar dos reacciones más a la síntesis (protección/desprotección), esto reduce el rendimiento de la reacción, aumenta el uso de otros reactivos e incrementa la posibilidad de formación de subproductos (Figuras 2 y 3).

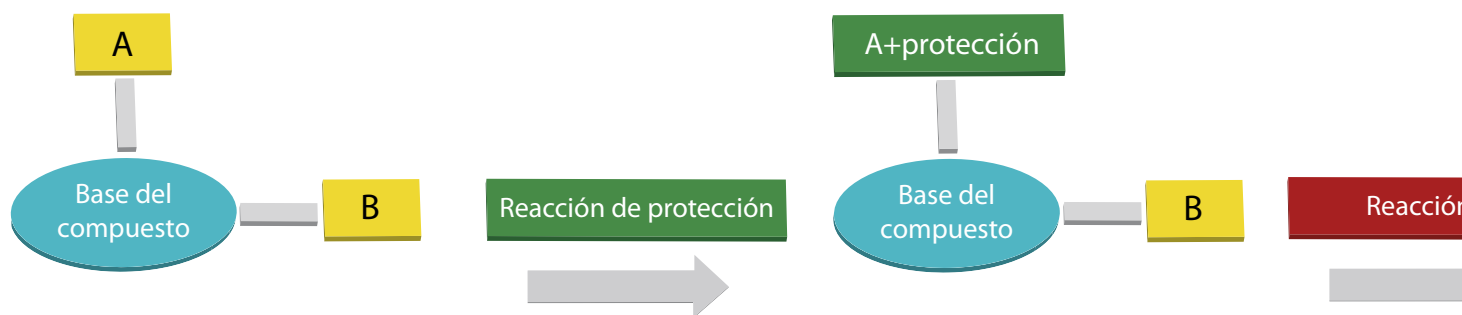


Figura 3. Esquema de una reacción de protección/desprotección.

blocks, through biochemical processes, sugars are fermented to generate molecular blocks a huge number of possibilities of selective synthesis.

We invite you to read more about this in the article "The New Chemistry: biomass and building blocks" which we have prepared for you.

### 9. Catalysis

Catalysts should be used - as selective as possible - because they afford better yields than the stoichiometric reagents.

The reactions require a certain minimum amount of energy to be carried out, the latter is called "activation energy" (Figure 4), which in molecular terms can be defined as the average minimum speed needed by particles to have effective shocks. For a reaction to occur between 2 molecules, they should collide in the correct orientation, having a minimum amount of energy to overcome the atoms electron repulsion. This is why many reactions must be carried out at high pressures and temperatures.

One way to reduce the activation energy is by means of catalysts that typically operate by surface phenomena, thus increasing the effective shocks between molecules or modify their electronic arrangement, allowing easier breaking and bond formation.

It is important to add that a catalyst does not modify the equilibrium of the reaction, i.e. the ratio between the products and reagents is preserved, so only the reaction rate increases (Figure 4), and allows that often the reactions are carried out under milder conditions, at ambient temperature and pressure.

This is why Green Chemistry encourages the use of specific catalysts in reactions, because they not only decrease the extra energy to carry out a reaction, but also allow the high specificity of the reactions, with the corresponding decrease in the production of by-products.

The most specific catalysts in existence are the enzymes, which are macromolecules involved in very complex reactions and at relatively mild temperatures, for example, via enzymatic reactions that are carried out in

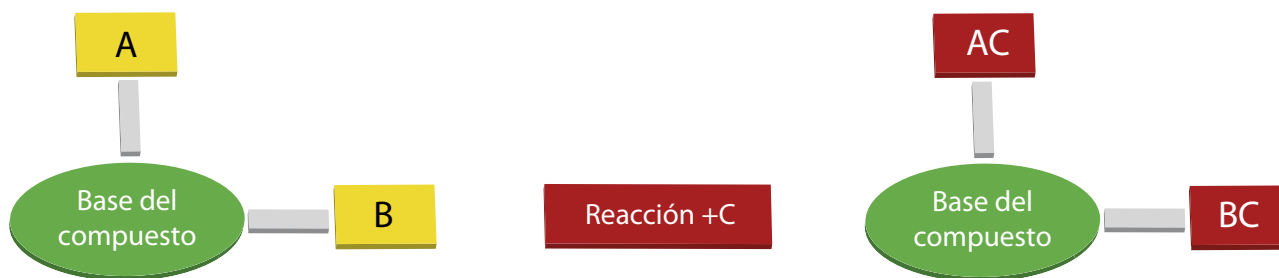


Figura 2. Formación del producto no deseado.

Además, en la química clásica se utilizan diferentes tipos de modificaciones físicas, es decir, se pasa de estado líquido a gaseoso, o a través de diferentes sistemas de compresión y expansión.

El objetivo último de la química verde es que la reacción se lleve a cabo en un sólo paso y con el mismo estado de agregación. Esto en muchas ocasiones puede ser muy complicado, la solución radica en que las materias primas sean de una naturaleza parecida a los productos de las reacciones.

Un ejemplo de esta tecnología es la utilización de los azúcares como materia prima de plataformas de intermedios o bloques constructores; a través de procesos bioquímicos los azúcares son fermentados para generar bloques moleculares que ofrecen una gran cantidad de posibilidades de síntesis selectivas. Te invitamos a leer más sobre este tema en el artículo "La nueva química: biomasa y los bloques constructores" que al respecto hemos preparado para ti.

### 9. Catálisis

Se deben de emplear catalizadores -lo más selectivos posible-, debido a que presentan mejores rendimientos que los reactivos estequiométricos.

Las reacciones necesitan una cierta cantidad mínima de energía para llevarse a cabo, a ésta se le denomina "energía de activación" (Figura 4), que en términos moleculares se puede definir como la velocidad mínima promedio que necesitan las partículas para tener choques efectivos. Para que ocurra una reacción entre dos moléculas, éstas deben colisionar en la orientación

a living being, do not exceed, in most cases, 32°C. The challenge for modern Chemistry is to seek analogous enzymes to replace the traditional production process; this is called "Supramolecular Chemistry".

An example of this is the use of Cyclodextrins as catalysts. The Cyclodextrins present a molecular formation that resembles a boat without background, which is hydrophilic in the outside, allowing it to be water soluble, and hydrophobic inside, able to store another molecule of the same polar nature, this conformation allows Cyclodextrins to be used as enzyme analogues (Figure 5).

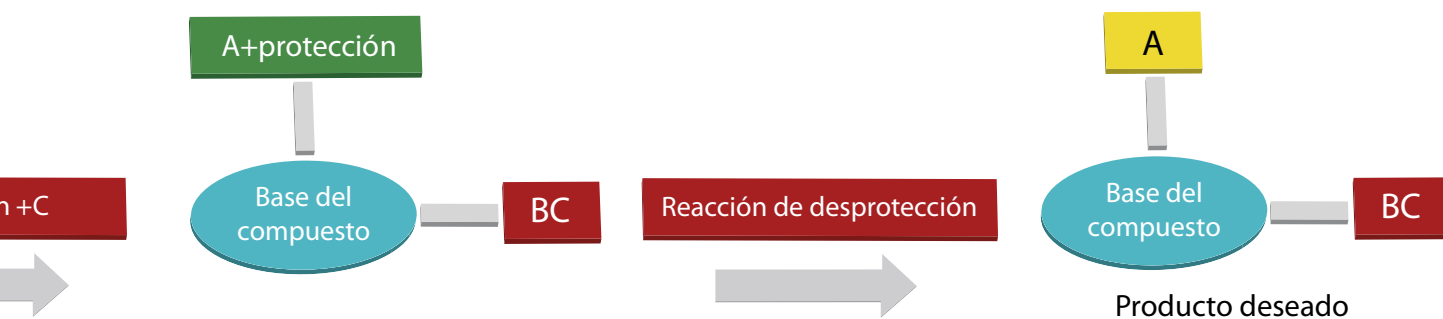
### 10. Design for Degradation

Design chemical products so they break down into innocuous products that do not persist in the environment.

In the search for new materials and products, traditional Chemistry focused to solve the immediate problem, and rarely asked which the final destination of the material produced was. An example of this is the Food Packaging Industry models, which aims to preserve products with expiry date of month's time, in containers that take decades to degrade. For example, PET takes 100 years or more to be degraded.

This long residence time of some synthetic materials involves the possible generation of huge impacts on nature, such as land and water degradation ecosystems by plastics and packaging in general.

This is why Green Chemistry proposes the use of materials with useful lifetime according to the function they

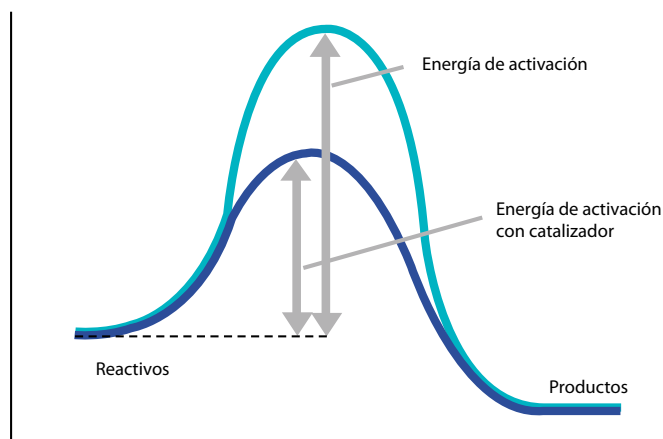




correcta y poseer una cantidad de energía mínima para superar la repulsión electrónica de los átomos. Es por esto que muchas reacciones se tienen que llevar a cabo a altas presiones y temperaturas.

Una forma de reducir la energía de activación es por medio de catalizadores, los cuales suelen funcionar por fenómenos de superficie, así pueden aumentar los choques efectivos entre las moléculas o modificar su disposición electrónica, permitiendo que sea más fácil la ruptura y formación de los enlaces.

Es importante agregar que un catalizador no modifica el equilibrio de la reacción, es decir, la proporción entre los productos y los reactivos se conserva, por lo que sólo aumenta la velocidad de reacción (Figura 4), y permite que en muchas ocasiones éstas se lleven en condiciones más suaves, a temperatura y presión ambiente.



**Figura 4.** Esquema de la energía de activación para una reacción, con y sin catalizador.

Es por esto que la química verde impulsa el uso de catalizadores específicos en las reacciones, pues no solamente disminuyen la energía extra para llevar a cabo una reacción, sino que además permiten la alta especificidad en las reacciones, con su respectiva disminución en la producción de subproductos.

Los catalizadores más específicos que existen son las enzimas, que son macromoléculas que participan en reacciones muy complejas y a temperaturas relativamente suaves; por ejemplo, las reacciones por vía enzimática que se llevan a cabo en un ser vivo no superan, en la mayoría de los casos, los 32°C. El reto para la química moderna es buscar enzimas o análogos que sustituyan los procesos de producción tradicionales, a esto se le denomina “química supramolecular”.

Un ejemplo de esto es la aplicación de las Ciclodextrinas como catalizadores. Las Ciclodextrinas presentan una formación molecular que asemeja a un bote sin fondo, el cual es hidrofílico por fuera, lo que le permite ser soluble en agua, e hidrofóbico por dentro, con capacidad de almacenar otra molécula de la misma naturaleza

perform, if the contents of the package takes months to decompose, your container should have the same magnitude of lifetime. Currently, materials are being developed as the biodegradable plastics, which use additives in their production that allow their polymer chains to be less stable, which facilitates that thermal or mechanical abrasion start the process of bacterial degradation.

However, we have to be very careful with degradable materials, since many of them have only reduced the residence time from hundreds of years to, decades, with a strong impact on the environment. On the other hand, if materials are degraded to another source of pollution or greenhouse gases or toxic products, it is better to use longer lasting materials, but easily reusable. It is important to consider that although being biodegradable, to produce a container has at least a minimum energy cost, so it is important to open reutilization options.

### 11. Real-time analysis for Pollution Prevention

Develop analytical methodologies needed to allow for real-time, in-process monitoring and control prior to the formation of hazardous substances.

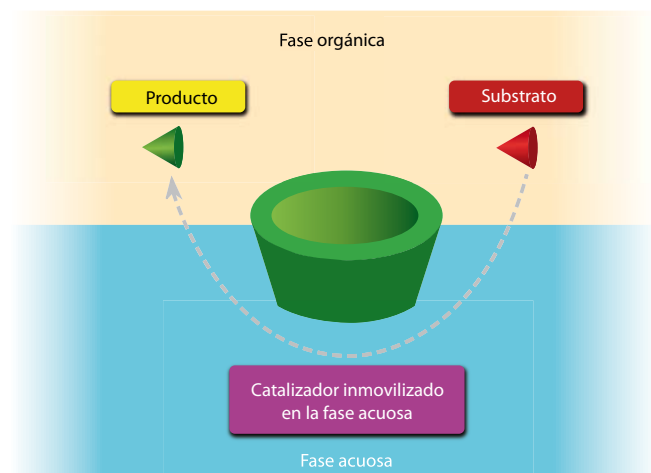
In traditional Chemistry the environmental impacts were assessed when the adverse effects were pretty evident, or when the ecosystem carrying capacity was overcome. Many environmental evaluations only take into account the medium-term impacts, i.e. they do not consider the immediate effects (e.g. thermal shock, noise emissions, decrease of the amount of oxygen available, etc.) or long term effects or chronic conditions of ecosystems as the biomagnifications and bio-accumulation of metals.

This is why Green Chemistry promotes improved measurement systems so that the evaluations can take place quickly and continuously.

An example of the need for improved systems for real time evaluations is the measurement of concentrations of antibiotics in aquatic ecosystems. The basis of all ecosystems are microorganisms, as they are responsible for degrading organic matter, as well as nitrogen fixation, and are used as food for larger species. Antibiotics are substances that inhibit the growth of certain kinds of microorganisms, or even kill them, most of them bacteria, these compounds were designed primarily for safeguarding human health, however, antibiotics have recently been used in food production systems such as livestock and aquaculture, and often no controls have been used, which has allowed for downloading large amounts of these compounds into the environment.

Recently researchers have drawn attention to the possible impact of the use of antibiotics to the environ-

polar, esta conformación permite que las Ciclodextrinas sean utilizadas como análogos de enzimas (Figura 5).



**Figura 5.** Esquema de una reacción catalizada por una ciclodextrina.

## 10. Diseñar para la degradación

Los productos químicos tienen que ser diseñados de tal manera que al final de su vida útil se descompongan en productos inocuos y no sean persistentes en el medio ambiente.

En la búsqueda de nuevos materiales y productos, la química tradicional se enfocaba en resolver el problema inmediato, y pocas veces se preguntaba cuál era el destino final del material fabricado. Un ejemplo de esto es la Industria de los Envases para Alimentos, la cual pretende conservar productos con tiempo de caducidad de meses, en contenedores que tardan décadas para degradarse. Por ejemplo, el PET tarda 100 años o más para ser degradado.

Este tiempo tan largo de residencia de algunos materiales sintéticos implica que puedan generar enormes impactos a la naturaleza, como la degradación de ecosistemas terrestres y acuáticos por plásticos y envases en general.

Es por esto que la química verde propone el uso de materiales con un tiempo de vida útil acorde a la función que realizan, si el contenido del envase tarda meses en descomponerse, su contenedor tendría que tener la misma magnitud de tiempo de vida útil. Actualmente se están desarrollando materiales como los plásticos biodegradables, los cuales en su producción utilizan aditivos que permiten que sus cadenas poliméricas sean menos estables, lo que facilita que la abrasión térmica o mecánica inicie el proceso de degradación bacteriana.

Sin embargo, se tiene que tener mucho cuidado con los materiales degradables, ya que muchos de ellos sólo presentan una reducción de tiempo de residencia de cientos de años, a décadas, con un fuerte impacto al medio ambiente. Por otra parte, si los materiales se degradan a otra fuente de contaminación como gases

ment, especially water, it is estimated that these compounds can cause huge changes in ecosystems even at very low concentrations. Therefore, liquid chromatography systems have been designed or ultra efficient liquid chromatography coupled to mass spectrometry, these systems can detect antibiotics such as Amoxicillin and Sulfametoxazole at concentrations of nanograms per litre.

The environmental impacts depend on many factors, and a contaminant, even at low concentrations, can strongly damage the ecosystems. This is why Green Chemistry is encouraging the improvement of measurements and proposes to be done in real time.

## 12. Inherently Safer Chemistry for Accident Prevention

Choose substances and the form of a substance used in a chemical process to minimize the potential for chemical accidents, including releases, explosions, and fires.

In all industrial processes there is a risk inherent to the process, in its calculation, frequency is combined with the severity of a possible accident, i.e. for a potential accident to be of high risk, it is necessary that the potential consequences are serious and with high occurrence probability.

In classical Chemical Industry, particularly in the Petrochemical industry, processes with a very high risk are handled. Although the Chemical and Nuclear industries have increased their security controls to decrease possible impact to human health and the environment, when dealing with extremely toxic and volatile substances, the probability of an accident could be little, but never zero, which is always a potential hazard.

Much has been done in terms of safety, as of the worst accidents of Chemical Industry, the methyl isocyanine leak in Bhopal, India, the LP gas explosions in San Juan Ixhuatepec, Mexico and the accident at the Chernobyl nuclear centre (Ukraine) April 26, 1986. From these terrible accidents, automated controls have been designed for safety, protection layers, and above all, much time and money has been invested to reduce industrial accidents.

However, these advances in security did not prevent the nuclear accident in Fukushima, Japan in 2011, which comprises a series of incidents, such as explosions in the buildings housing the nuclear reactors, failure in the cooling systems, triple nuclear fusion and radiation release abroad; this incident was caused by the earthquake of 9.0 magnitude on the Richter scale, on the northeast coast of Japan and subsequent tsunami. To these natural catastrophes joined the security breaches of the plant, which had protective walls six



de efecto invernadero o productos tóxicos, es mejor utilizar materiales más duraderos, pero que sean fácilmente reutilizables. Hay que considerar que, aunque sean biodegradables, producir un envase tiene, por lo menos, un costo energético, por lo que es importante abrir opciones a la reutilización.

### 11. Análisis en tiempo real para la prevención de la contaminación

Es necesario desarrollar metodologías analíticas para determinar y controlar en tiempo real la producción de sustancias peligrosas.

En la Industria Química tradicional los impactos ambientales eran evaluados cuando los efectos adversos eran prácticamente evidentes, o cuando la capacidad de carga de los ecosistemas era superada. Muchas de las evaluaciones ambientales sólo toman en cuenta los impactos a mediano plazo, es decir, no se toman en cuenta los efectos inmediatos (p.ej. choques térmicos, emisiones de ruido, disminución de la cantidad de Oxígeno disponible, etc.) o los efectos a largo plazo o afeciones crónicas de los ecosistemas como la bioacumulación y la biomagnificación de metales.

Es por esto que la química verde impulsa la mejora de los sistemas de medición, para que se puedan llevar cabo de manera rápida y continua.

Un ejemplo de la necesidad de mejora de los sistemas de evaluaciones en tiempo real es la medición de concentraciones de antibióticos en los ecosistemas acuáticos. La base de todos los ecosistemas son los microorganismos, ya que son los responsables de degradar la materia orgánica, de fijar el Nitrógeno, y son utilizados como alimento para especies mayores. Los antibióticos son sustancias que impiden el crecimiento o matan a cierta clase de microorganismos, en su gran mayoría bacterias, estos compuestos fueron diseñados principalmente para salvaguardar la salud humana; no obstante, recientemente los antibióticos han sido utilizados en sistemas de producción alimentaria como la ganadería y la acuicultura, y en muchas ocasiones se han utilizado sin controles, lo que ha permitido la descarga de grandes cantidades de estos compuestos al ambiente.

Recientemente los investigadores han llamado la atención hacia los posibles impactos al medio ambiente por el uso de los antibióticos, sobre todo en los medios acuáticos, se calcula que estos compuestos pueden llegar a hacer grandes modificaciones en los ecosistemas incluso a concentraciones muy bajas. Por esto es que se han diseñado sistemas de cromatografía de líquidos o cromatografía de líquidos de ultraeficiencia (UPLC) acoplada a espectrometría de masas, estos sistemas pueden detectar antibióticos como la Amoxicilina y el Sulfametoxazol, a concentraciones de nanogramos por litro.

meters tall, in a region where they have recorded tsunamis over 20 meters.

These examples show that although it is important to decrease the risk possibility, intrinsically safe design processes must be designed, following with the example of nuclear energy, a switch to wind or photovoltaic technology can lead to energy production, but with cleaner and safer processes.


For Chemical Industry, safer processes must be designed with products and biodegradable and non-toxic solvents, with softer reaction conditions, with zero waste and by-products production.

### Principles Integration

As we can see, the 12 principles of Green Chemistry are not isolated; they work together and in synergy with the aim of achieving a sustainable industry, i.e. we have to build an economically profitable, socially desirable and environmentally Chemistry viable that lasts over time.

With this in mind, scientists and engineers worldwide are posing a paradigm shift in the way we create and process models, both for research and production. The advent of "Green Chemistry" with engineering as counterpart, is considering a new approach in the way of carrying out reactions; through "waste prevention", a way to look for reactions with an efficiency of 100% is suggested, carried out at ambient temperature and pressure (heat loss is also a waste), which takes advantage of total raw materials (or reagents) used, avoiding by-products that represent a huge expense, both for the purification of the main product, and the waste management involved.

Thus, a different chemistry seems to come to our reality, one not oil dependent, not even as primary input or as energy source. The use of biomass as feedstock can be a great solution to chemicals, more friendly to the environment than those that are currently available. To make this a reality, we must emphasise the review of all the life cycle of the inputs, outputs and processes, as it has occurred - and still is - that high biodiversity areas are devastated to produce monocultures as feedstock for industrial processes. This new Chemistry, to which we refer, takes the example of the nature and emulates it to offer solutions that we can call "sustainable."

In Mexico we have conditions to develop this industry and see the results in the medium to long term, however, this Chemistry chemical will not result by itself, as any far reaching change, requires a confluence of factors: a new focus in basic and applied research, government support, both regulatory and through incentives, and interest and investment by the private sector to make these processes become a reality at national level. 

Los impactos al medio ambiente dependen de muchos factores, y un contaminante, incluso a bajas concentraciones, puede dañar fuertemente a los ecosistemas. Es por esto que la química verde impulsa la mejora en las mediciones y propone que sean en tiempo real.

## **12. Química intrínsecamente segura en lugar de prevención de accidentes**

Las sustancias y su uso dentro de los procesos químicos tienen que ser de tal manera que se minimicen los potenciales accidentes químicos, incluyendo las emanaciones, explosiones e incendios.

En todos los procesos industriales existe un riesgo inherente al proceso, en su cálculo se combina la frecuencia con la gravedad de un posible accidente. Es decir, para que un posible accidente sea de alto riesgo requiere que las consecuencias potenciales sean graves y que presente una probabilidad alta de ocurrencia.

En la Industria Química clásica, sobre todo en la Petroquímica, se manejan procesos con un riesgo muy alto. No obstante que las Industrias Química y Nuclear han incrementado sus controles de seguridad para disminuir posibles impactos a la salud humana y al medio ambiente, al manejar sustancias extremadamente tóxicas y volátiles, aunque la probabilidad de que ocurra un accidente sea poca, nunca es cero, lo que siempre representa un peligro potencial.

Mucho se ha hecho en términos de seguridad desde los peores accidentes de la Industria Química -la fuga de Isocianato de Metilo en Bhopal, India, las explosiones de gas LP en San Juan Ixhuatepec, México y, el accidente de la central nuclear de Chernóbil (Ucrania) el 26 de abril de 1986-. A partir de estos graves accidentes, se han diseñado controles automatizados de la seguridad, capas de protección, y sobre todo, se ha invertido mucho tiempo y dinero para reducir los accidentes industriales.

Sin embargo, estos avances en seguridad no impidieron el accidente nuclear de Fukushima, Japón en el 2011, el cual comprende una serie de incidentes, tales como las explosiones en los edificios que albergan los reactores nucleares, fallos en los sistemas de refrigeración, triple fusión del núcleo y liberación de radiación al exterior; este siniestro fue provocado por el terremoto magnitud 9.0 en la escala de Richter, en la costa noreste de Japón y su posterior tsunami. A estas catástrofes naturales se sumaron fallas en la seguridad de la planta, la cual contaba con muros de protección de seis metros, en una región donde se tienen registrados tsunamis de más de 20 metros.

Estos ejemplos nos indican que aunque sea importante disminuir la posibilidad de riesgo, se tienen que diseñar procesos intrínsecamente seguros; siguiendo con el ejemplo de la energía nuclear, un cambio a tecnología

eólica o fotovoltaica puede conllevar a la producción de energía, pero con procesos más limpios y seguros.

En el caso de la Industria Química, se tienen que diseñar procesos más seguros, con productos y disolventes degradables y no tóxicos, con condiciones de reacción más suaves, con la cero producción de residuos y subproductos.

## **Integración de principios**

Como podemos observar, los 12 principios de la química verde no son aislados, trabajan en conjunto y de manera sinérgica con el objetivo de alcanzar una industria sustentable. Es decir, tenemos que construir una química que sea económicamente rentable, socialmente deseable, y ecológicamente viable, que perdure a lo largo del tiempo.

Con esto en mente, científicos e ingenieros a nivel mundial están planteando un cambio de paradigmas en el modo de concebir los modelos y procesos, tanto de investigación, como de producción. El advenimiento de la "química verde" -con su contraparte de ingeniería- está planteando un nuevo enfoque en el modo de hacer reacciones; a través de "prevenir desechos", se sugiere un camino hacia la búsqueda de reacciones con una eficiencia del 100%, llevadas a cabo a temperatura y presión ambiente (también la pérdida de calor es un desecho), con lo que se aprovecha el total de las materias primas (o reactivos) utilizadas, se evitan los subproductos que representan un enorme gasto, tanto por la necesaria purificación del producto principal, como por la gestión de residuos que supone.

Así, una química diferente parece llegar a nuestra realidad, una que no depende del petróleo ni como principal insumo, ni como fuente de energía. El aprovechamiento de la biomasa como materia prima puede ser una gran solución a la demanda de productos químicos que sean más amigables con el ambiente que los actualmente disponibles. Para que esto sea una realidad, hay que poner énfasis en ver todo el ciclo de vida de los insumos, productos y procesos, pues ha ocurrido -y sigue ocurriendo- que zonas de alta biodiversidad son devastadas para producir monocultivos como materia prima para procesos industriales. Esta nueva química a la que nos referimos, toma como ejemplo a la naturaleza y la emula para ofrecer soluciones que podemos llamar "sustentables".

En México tenemos condiciones para desarrollar esta industria y ver sus frutos a mediano y largo plazo; sin embargo, esta química no se dará por sí sola, como todo cambio de largo alcance, necesita una confluencia de factores: un nuevo enfoque en la investigación básica y aplicada, apoyos gubernamentales, tanto regulatorios como en incentivos diversos, y el interés e inversión por parte de la iniciativa privada para hacer que estos procesos se conviertan en una realidad a nivel nacional. ☐