



SELLO INNOVACIÓN EN  
**EDUCACIÓN  
CIENTÍFICA**  
Fundación Ciencia Joven con apoyo de la  
OREALC / UNESCO



# **Capacitación de docentes en la enseñanza de la Química desde la perspectiva de la Química Verde**

## **Guía de Laboratorio VIII Bases de la Química Orgánica y Química Verde**

Santiago, 2015



La química orgánica es una rama de la química en la que se estudian los compuestos del carbono y sus reacciones. En ese sentido, es posible decir que existe una amplia gama de sustancias (medicamentos, vitaminas, plásticos, fibras sintéticas y naturales, hidratos de carbono, proteínas y grasas) formadas por moléculas orgánicas.

Esta rama de la química ha afectado profundamente la vida desde el siglo XX: ha perfeccionado los materiales naturales y ha sintetizado sustancias naturales y artificiales que, a su vez, han mejorado la salud, han aumentado el bienestar y han favorecido la utilidad de casi todos los productos actuales.

Materiales orgánicos son todos aquellos que poseen en su estructura química el elemento carbono, por lo tanto entran en su categoría todos los seres vivos, los hidrocarburos, y en especial el petróleo y sus derivados, lo cual hace que su estudio sea fundamental para el entendimiento de diversos procesos que se producen día a día.

En ese sentido, conocer la base de la química orgánica, no solo permite saber cómo funcionan los compuestos orgánicos sino que también permite trabajar de forma racional con los mismos, con el fin de mejorar los rendimientos de los productos reduciendo el uso de compuestos auxiliares y la producción de residuos, principios que están íntimamente ligados con la Química Verde.



## **Tabla de contenidos.**

### **Parte I. Química del Carbono y Bases de la Química Orgánica.**

1. Introducción.
2. El átomo de carbono.
3. Hidrocarburos Alifáticos.
4. Hidrocarburos Cíclicos.
5. Grupos Funcionales.

### **Parte II. Bases de la Química Orgánica y Química Verde.**

1. Introducción.
2. Principios de la Química Verde.
3. Catálisis y Catalizadores.
4. Otras alternativas catalíticas: Los Líquidos Iónicos.
5. Síntesis de Líquidos Iónicos.
6. Propiedades de los Líquidos Iónicos.
7. Aplicaciones de los Líquidos Iónicos.
8. Los Líquidos Iónicos como catalizadores.

### **Parte III. Trabajo Práctico**

1. Objetivos de la actividad.
2. Conceptos asociados en la actividad.
3. Materiales y reactivos.
4. Metodología.

### **Parte IV. Ficha de trabajo.**

1. Observaciones sustraídas de la actividad.
2. Explicación de las observaciones.
3. Principio de la Química Verde abordado.
4. Aprendizajes obtenidos. Conclusiones preliminares.
5. Preguntas y Cuestionamientos.

## **Referencias.**



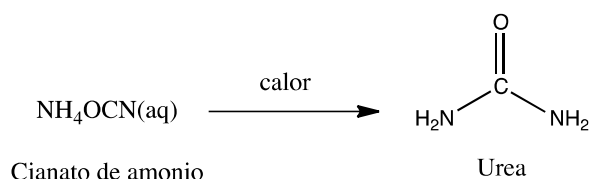
## Parte I. Química del Carbono y Bases de la Química Orgánica.

### 1. Introducción

Desde la prehistoria el hombre ha utilizado distintos materiales como combustibles para obtener calor del fuego. Desde esa época el hombre primitivo se daba cuenta que el fuego no afectaba de la misma forma a un trozo de madera que una piedra, al aceite que un trozo de hierro, o la grasa frente al agua. Estudios más acabados del siglo XVII daban cuenta que las diferencias iban más allá de la mera combustibilidad. Las sustancias no-vivas, tales como las piedras o el metal, son capaces de soportar el calor, mientras que las sustancias provenientes de la materia viva al aplicárseles calor, humeaban y se carbonizaban.

Las diferencias eran fundamentales y en 1807, Jöns Jacob Berzelius sugirió que las sustancias que provenían de organismos vivos, se llamaran orgánicas, mientras que aquellas que provenían del medio no viviente, se llamarían inorgánicas. En ese sentido, cuando se calienta un compuesto inorgánico, este sigue siendo inorgánico, al contrario de un compuesto orgánico que pasa a ser inorgánico. Esta diferencia hizo pensar que los compuestos orgánicos que constituían a los seres vivos tenían propiedades que los compuestos inorgánicos no podían reproducir.

En aquella época se entendía a la vida, desde las ciencias naturales, como algo especial, razón por la cual nació la tesis de que los compuestos orgánicos tenían “algo” que hacía que las leyes que regían a los objetos “no vivos” no fueran las mismas, a dicha concepción se le conoció como vitalismo. Esta opinión fue rebatida por primera vez con el trabajo de Friederich Wöhler quien estudiando el cianato de amonio, compuesto inorgánico, sintetizó urea (Figura 1) un compuesto orgánico, lo cual terminó por acabar con la teoría del vitalismo.



**Figura 1. Reordenamiento de cianato de amonio acuoso, a través de calor para formar urea.**

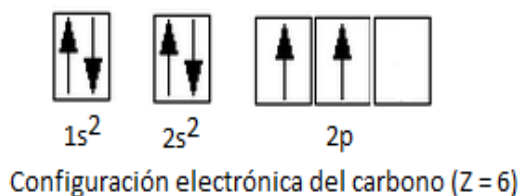
El enfoque moderno actual acepta una sustancia orgánica como cualquiera que posea átomos de carbono. A excepción de óxidos de carbono simples (CO y CO<sub>2</sub>), formas alotrópicas de carbón (grafito y diamante entre otras), cianatos y cianuros simples (compuestos con CN), carbonatos (compuestos que contienen CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>) y carburos (compuestos de carbono del tipo M<sub>x</sub>C<sub>y</sub>) por consideraciones de carácter histórico.



## 2. El átomo de carbono

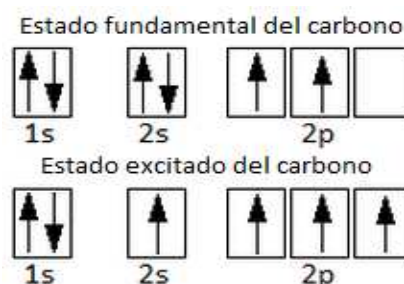
La cantidad de compuestos orgánicos es tan grande, para por ejemplo, para una fórmula molecular  $C_{30}H_{62}$  existen más de 4.111.846.763 posibles combinaciones de estructuras químicas verosímiles, lo cual se contrasta con el número estimado de compuestos inorgánicos el cual se estima es de varios cientos, muy inferior al total de compuestos orgánicos.

Esta disparidad en las cantidades entre ambos tipos de compuestos, se debe a las características del principal componente de los compuestos orgánicos, esto es, los átomos de carbono, los cuales poseen ciertas características que lo hace un elemento ideal para formar moléculas. Para entender las características esenciales del carbono, es necesario comprender su estructura electrónica.



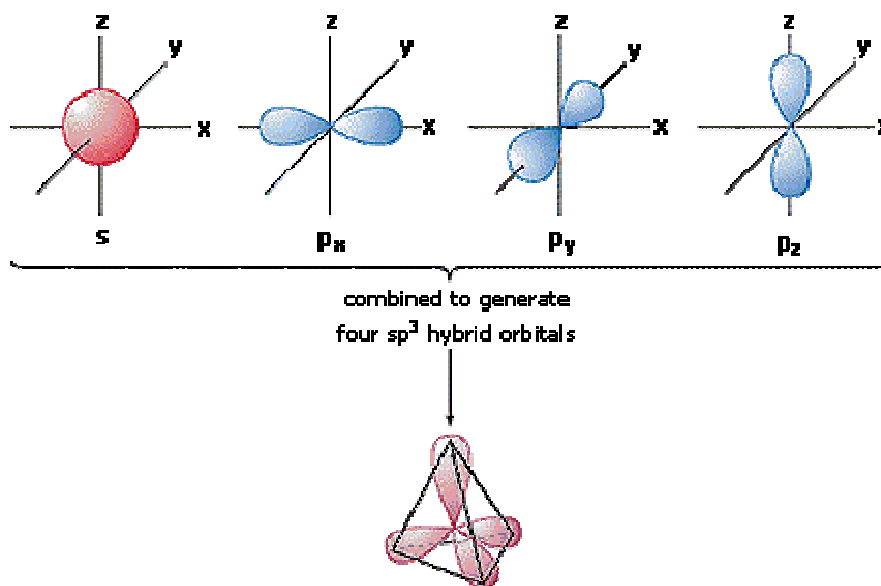
Si observamos con detalle, este posee 4 electrones de valencia lo que le da la necesidad de recibir 4 electrones más para llegar a la configuración del gas noble más cercano ( $_{10}Ne$ ), regla del octeto. Para recibir estos cuatro electrones el átomo de carbono sale del estado basal (Figura 2) y entra en un estado excitado donde existe una promoción de electrones desde el 2s al 2p y así obtener una nueva configuración electrónica.

**Figura 2. Estado Fundamental y Excitado del Carbono.**



El átomo de carbono combina los orbitales atómicos 2s, 2p<sub>x</sub>, 2p<sub>y</sub>, 2p<sub>z</sub> para formar nuevos orbitales llamados, orbitales atómicos híbridos. A este proceso se le conoce como hibridación<sup>1</sup> y los orbitales resultantes en este caso reciben el nombre de sp<sup>3</sup> para indicar que tienen una parte del carácter del orbital s y tres partes del carácter del orbital p. La hibridación permite explicar, la posibilidad del átomo de carbono de formar cuatro enlaces y además estos tener ángulos de 109,5° ya que se combina la orientación espacial de los 4 orbitales (Figura 3).

<sup>1</sup> Es un método matemático en el que se combinan orbitales para obtener nuevos orbitales atómicos híbridos, donde estos tienen, en proporciones variables, las propiedades de los orbitales originales tomados por separado.

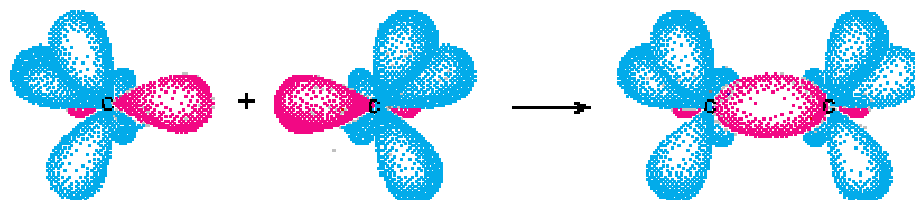


**Figura 3.** Formación de 4 orbitales  $sp^3$  a partir de los orbitales s y p.

Además de la hibridación  $sp^3$  el átomo de carbono también posee hibridación  $sp^2$  y  $sp$ , así en los compuestos orgánicos es posible encontrar 3 tipos de carbono;

- $sp^3$ , hibridación de un orbital s y 3 p
- $sp^2$ , hibridación de un orbital s y 2 p
- $sp$ , hibridación de un orbital s y p

Cuando 2 átomos se enlazan, solapan sus orbitales atómicos para formar el orbital molecular, en ese sentido, 2 átomos de carbono con hibridación  $sp^3$  el solapamiento se hace de manera frontal entre los orbitales atómicos híbridos  $sp^3$  (Figura 4)

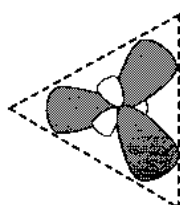


**Figura 5.** Formación de un enlace simple a partir de los orbitales  $sp^3$  de cada átomo.

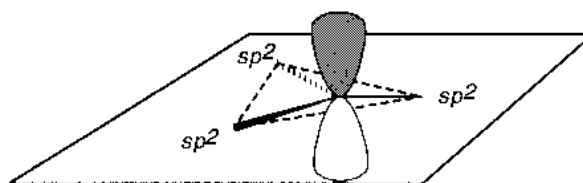


Este enlace formado, producto del solapamiento frontal de los orbitales, se le conoce como enlace sigma ( $\sigma$ ), de esta manera se explica que los 4 orbitales híbridos  $sp^3$  puedan enlazarse a otros cuatro átomos (tetravalencia).

Para el caso de átomos de carbono con hibridación  $sp^2$  significa que existe un orbital p que no está formando parte de la hibridación, el cual queda perpendicular al resto de orbitales híbridos  $sp^2$  (Figura 6)



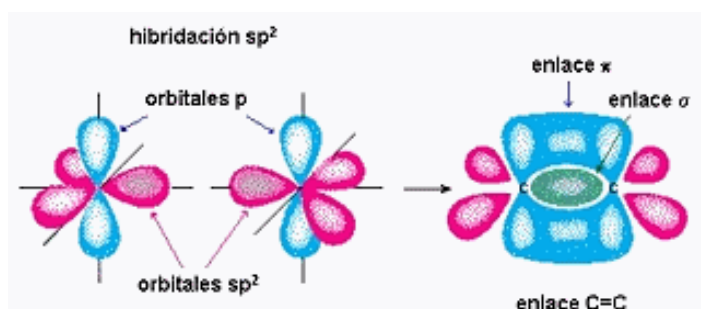
Los tres orbitales  $sp^2$  en el plano



El orbital p sin hibridar perpendicular al plano de los orbitales  $sp^2$

**Figura 6. Estructura tridimensional de la hibridación  $sp^2$ .**

Como se puede observar en la Figura 6 los 3 orbitales híbridos  $sp^2$  poseen ángulos de  $120^\circ$  formando un plano el cual es perpendicular al plano del orbital p no hibridado. En consecuencia, cuando 2 átomos de carbono con hibridación  $sp^2$  se aproximan para solapar sus orbitales atómicos híbridos y formar en enlace, además de existir un solapamiento frontal entre los orbitales híbridos también producto del acercamiento entre los átomos, ocurre un solapamiento perpendicular entre los orbitales no híbridos p (Figura 7).

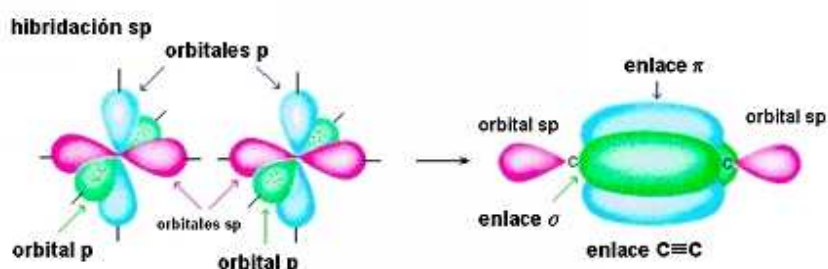


**Figura 7. Formación de un enlace doble a partir de los orbitales  $sp^2$  y p de cada átomo.**



El enlace que se forma a partir del solapamiento perpendicular, se denomina enlace pi ( $\pi$ ), así cuando 2 átomos con hibridación  $sp^2$  se enlazan, estos forman 2 enlaces, uno sigma y otro pi, la presencia de ambos enlaces se conoce con el nombre de enlace doble.

Por su parte, en átomos de carbono con hibridación  $sp$ , se generan 2 orbitales híbridos los cuales entre ellos poseen un ángulo de  $180^\circ$ . De este modo existen 2 orbitales p que no hibridaron y se encuentran de manera perpendicular a los orbitales híbridos  $sp$ . En ese sentido, cuando 2 átomos con hibridación  $sp$  se aproximan para solapar frontalmente sus orbitales híbridos y formar el orbital molecular, la aproximación produce que también exista un solapamiento perpendicular entre ambos orbitales p no hibridados de cada átomo (Figura 8).



**Figura 8.** Formación de un enlace triple a partir de los orbitales  $sp$  y  $p$  de cada átomo.

Así, se produce un enlace  $\sigma$  por el solapamiento frontal y 2 enlaces  $\pi$  producto del solapamiento perpendicular entre los 4 orbitales p no hibridados de ambos átomos, dicho enlace se conoce con el nombre de enlace triple.

Respecto a los enlaces sigma y pi, las características de los primeros son: el enlace se establece en la dirección del mismo y que se produce libre rotación de los átomos que lo forman. Por su parte, los enlaces pi se caracterizan por: que el enlace se establece perpendicular a la dirección del mismo y no es posible la libre rotación de los átomos que lo forman. Además de las anteriores características, otras se pueden obtener a partir de la Tabla 1, específicamente en lo que respecta a las distancias de enlace y energías de estos.

**Tabla 1.** Energías de enlace

Orden de enlace	Enlace Carbono-Carbono	Distancias de enlace (pm)	Energía (kcal/mol)
1	Simple	154	83,52
2	Doble	134	146,88
3	Triple	120	194,00

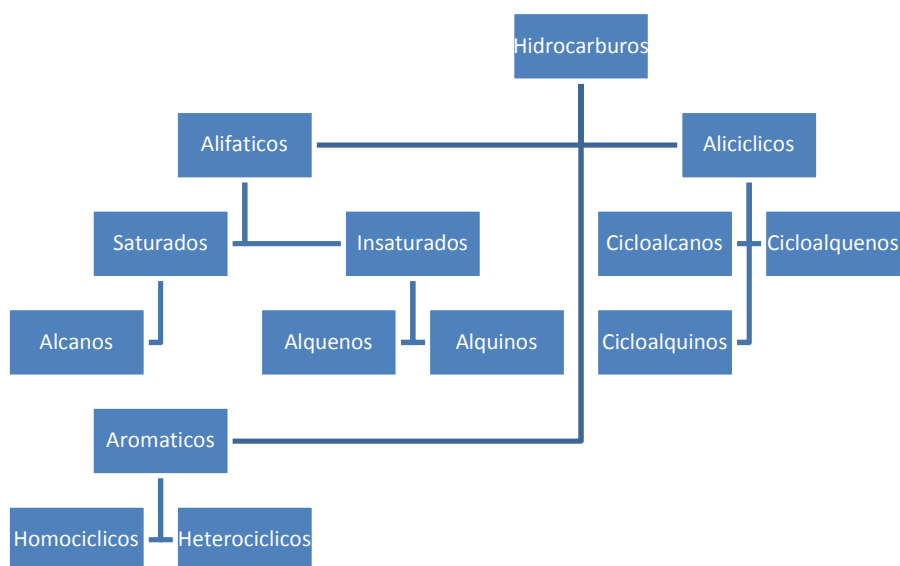




### 3. Hidrocarburos Alifáticos

Uno de los componentes más usados en la vida moderna actual es el Petróleo, el cual es una mezcla homogénea de compuestos orgánicos originados a partir de sedimentación de material orgánico desde tiempos prehistóricos, es por eso que a los derivados del petróleo se les llama combustibles fósiles. Los compuestos orgánicos de los cuales está constituido el petróleo se denominan hidrocarburos porque están constituidos únicamente de átomos de carbono e hidrógeno, así estos compuestos le otorgan las propiedades conocidas del petróleo como: ser combustible, insoluble en agua y menos denso que ella.

Los hidrocarburos se clasifican en, según el tipo de enlace entre los carbonos participantes, como saturados o insaturados, y también de acuerdo a su estructura molecular en alifáticos, alicíclicos y aromáticos, (Esquema 1)



**Esquema 1. Clasificación de los Hidrocarburos.**

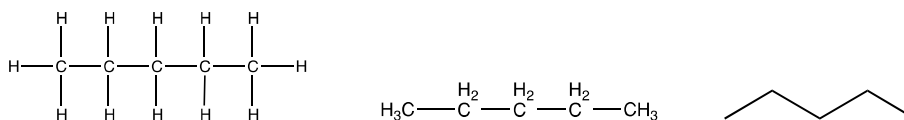
Para establecer la nomenclatura de los hidrocarburos alifáticos y de los compuestos orgánicos en general la IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada – International Union of Pure and Applied Chemistry) determinó un sistema para nombrar los compuestos orgánicos a partir del número de carbonos que contenga. Para ello se utilizan prefijos griegos de numeración detallados en la Tabla 2.



**Tabla 2. Prefijos para nomenclatura de compuestos orgánicos.**

N° de Carbonos	Prefijo Griego	N° de Carbonos	Prefijo Griego
1	Met	11	Undec
2	Et	12	Dodec
3	Prop	13	Tridec
4	But	14	Tetradec
5	Pent	15	Pentadec
6	Hex	16	Hexadec
7	Hept	17	Heptadec
8	Oct	18	Octadec
9	Nom	19	Nonadec
10	Dec	20	Eicos

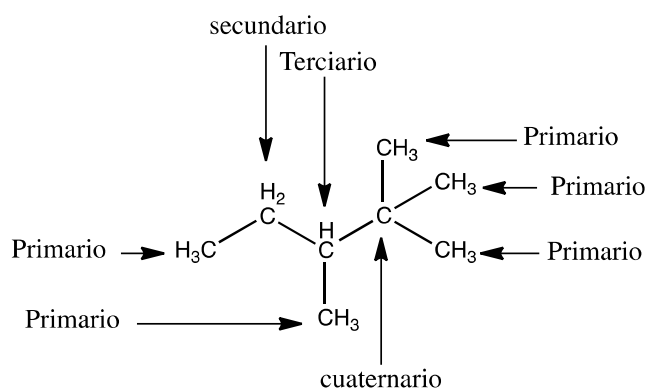
Por otro lado, la manera de representar las moléculas orgánicas desde un punto de vista estructural son las siguientes pueden ser las que se detallan en la Figura 9. En esta figura se observan 3 representaciones diferentes, pero que corresponden a la misma molécula.



**Figura 9. Representación de una molécula orgánica.**

### Alcanos

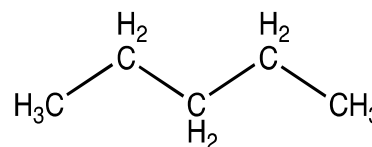
Los alcanos son dentro de los hidrocarburos las moléculas más simples, solamente poseen enlaces simples y su fórmula general es de la forma  $C_nH_{2n+2}$ , donde  $n$  representa el número de átomos de carbono dentro del alcano. Los alcanos los podemos clasificar en ramificados o lineales, siendo estos últimos los más simples. Además de clasificar los alcanos también se pueden clasificar sus átomos de carbono de acuerdo a si están unidos a 1, 2, 3 o 4 átomos de carbono más (Figura 10).



**Figura 10. Tipos de carbonos en una molécula orgánica.**

### Alcanos lineales

Los alcanos lineales solamente poseen carbonos primarios o secundarios. Para nombrar los alcanos se debe usar el sufijo *ano* que denota que la molécula es un alcano, y para el caso de alcanos lineales, hay que indicar el número de carbonos que posee la molécula.



La molécula que se presenta es un alcano lineal ya que posee sus átomos de carbono formando una sola cadena, para nombrarlos simplemente tenemos que tomar el número de átomos de carbono dentro de la molécula buscar el prefijo griego que le corresponde ese número y agregar el sufijo *ano* al nombre para indicar que es un alcano, para este caso la molécula se llama **pentano**

### Alquenos y Alquinos

Los alquenos no cíclicos cuya fórmula general es  $C_nH_{2n}$  y alquinos no cíclicos cuya fórmula general es  $C_nH_{2n-2}$  a diferencia de los alcanos, estos poseen carbonos con hibridación  $sp^2$  y  $sp$  respectivamente, dobles y triples enlaces concretamente. A dichos compuestos que poseen carbonos con dobles y triples enlaces se les denomina compuestos insaturados ya que sus átomos de carbono aun pueden enlazarse con más átomos de hidrógeno, al contrario de los compuestos que poseen todos sus carbonos con enlaces simples que se denominan saturados ya que poseen todos sus carbonos "saturados" de hidrógenos.



Para nombrar hidrocarburos insaturados se sigue un procedimiento similar que para alcanos lineales, con la excepción que.

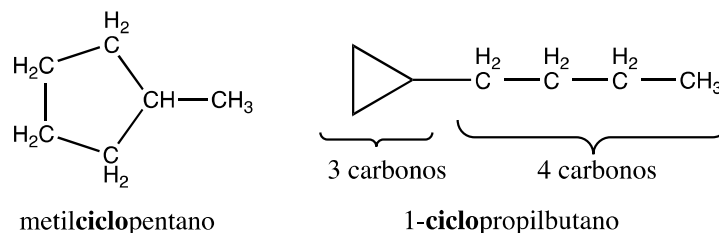
1. Para la elección de la cadena principal, esta DEBE contener la insaturación, el doble o triple enlace según corresponda, primando este criterio por sobre el número de carbonos de la cadena.
2. Cuando se numere los sustituyentes debe incluirse la insaturación, y está debe tener la menor numeración, primando este criterio por sobre los otros.
3. Cuando se escriba el nombre del compuesto se debe incluir la posición del doble o triple enlace según corresponda. Si la molécula presenta un doble enlace, entonces se usara el sufijo *eno* (por Alqueno) y si la molécula presenta un triple enlace se usara el sufijo *ino* (por Alquino).

La IUPAC acepta algunas ramificaciones insaturadas que poseen nombres no sistematizados, algunas de ellas son:

$\text{H}_2\text{C}=\overset{\text{wavy}}{\text{C}}$	$\text{H}_2\text{C}=\underset{\text{H}}{\text{C}}-\overset{\text{wavy}}{\text{C}}$	$\text{H}_3\text{C}-\underset{\text{H}}{\text{C}}=\overset{\text{wavy}}{\text{C}}$	$\text{H}_2\text{C}=\underset{\text{H}}{\text{C}}-\overset{\text{H}_2}{\text{C}}-\overset{\text{wavy}}{\text{C}}$
metilen	Vinil o etenil	etiliden	Alil o propenil

#### 4. Hidrocarburos Cíclicos

En la lección precedente se estudiaron los Alcanos lineales, ramificados, tanto saturados como insaturados, en esta lección se estudiarán los Hidrocarburos cíclicos. Para nombrar los cicloalcanos, cuya fórmula general es  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ , se nombran en general como aliciclos sustituidos.

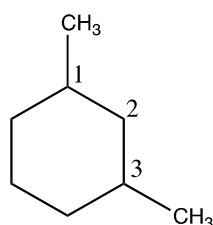


Note que cuando el anillo tiene sólo un sustituyente no es necesario indicar su posición. Por ejemplo, metilciclohexano no necesita escribirse como 1-metilciclohexano ya que la posición 1 es evidente cuando se numeran los ciclos. Pero si hay 2 o más ramificaciones, cada uno debe tener su prefijo de posición.

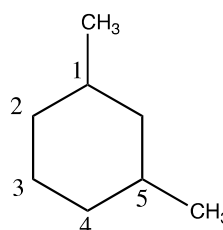


Las reglas de la IUPAC para nombrar estos ciclos son:

1. Compuestos con cadenas alifáticas y estructuras cíclicas se nombran como ciclo-cadena o cadena-ciclo usando como criterio: a) El máximo número de sustituciones en una unidad estructural, b) Se trata la unidad más pequeña como sustituyente de la unidad más grande (con mayor número de carbonos).



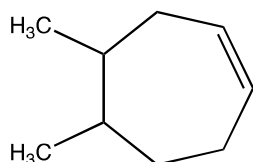
1,3-dimetilciclohexano



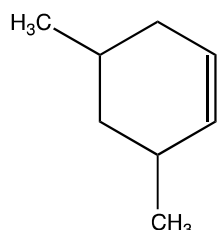
1,5-dimetilciclohexano

En este caso, se puede notar que la numeración para un mismo compuesto puede conducir a 2 respuestas, pero la que es correcta es aquella con la menor numeración en este caso el nombre correcto es 1,3-dimetilciclohexano.

2. En el caso de cicloalquenos y cicloalquinos sustituidos, para la elección de la cadena principal, esta DEBE contener la insaturación, el doble o triple enlace según corresponda, primando este criterio por sobre el número de carbonos de la cadena, o ciclo.
3. En el caso de cicloalquenos y cicloalquinos sustituidos, cuando se numere los sustituyentes debe incluirse la insaturación, y está debe tener la menor numeración, primando este criterio por sobre los otros.
4. En el caso de cicloalquenos y cicloalquinos sustituidos, cuando se escriba el nombre del compuesto se debe incluir la posición del doble o triple enlace según corresponda, a excepción de los ciclos en donde tenga posición 1.



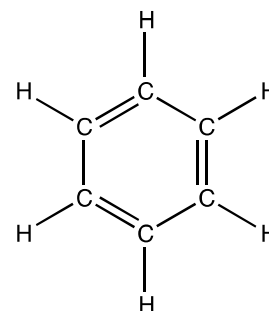
4,5-dimetilciclohepteno



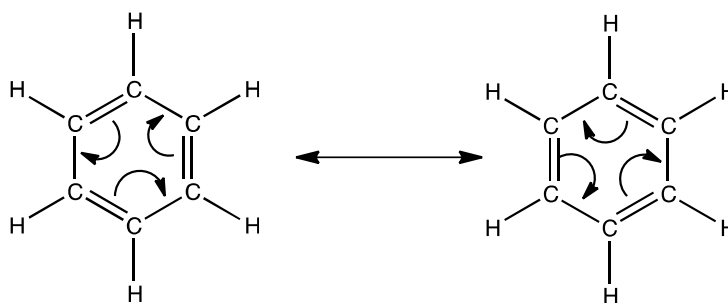
3,5-dimetilciclohexino

## Compuestos Aromáticos

Existe un compuesto muy importante dentro de la química orgánica, llamado benceno el cual es un compuesto muy común dentro de la amplia familia de compuestos orgánicos. La fórmula química del benceno se conocía hace mucho tiempo  $C_6H_6$  pero nadie hasta 1865 había logrado desentrañar su estructura, fue entonces cuando Friedrich August Kekulé von Stradonitz, más conocido como Kekulé, publica un artículo donde explica la estructura del benceno como un anillo con hidrógenos y enlaces dobles alternados (Figura lateral).

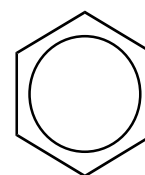


En la actualidad se sabe que los dobles enlaces del benceno se encuentran deslocalizados dentro de su estructura, es decir, no se encuentran fijos lo cual hace que estén en constante movimiento dentro del benceno (Figura 11)



**Figura 11. Estructura del Benceno (Enlaces dobles deslocalizados)**

Este proceso se le conoce como resonancia y las estructuras que se obtienen del movimiento de los dobles enlaces dentro de la estructura se les conoce como estructuras resonantes, por tanto, el benceno realmente es la combinación de sus estructuras resonantes (figura lateral). El proceso de deslocalización de sus dobles enlaces hace del benceno una estructura sumamente estable.



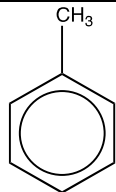
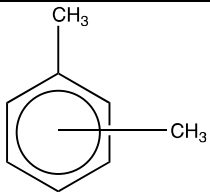
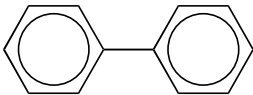
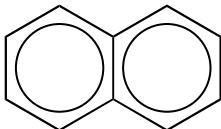
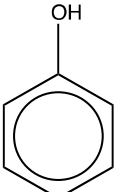
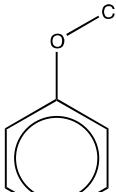
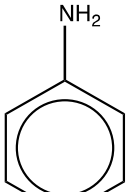
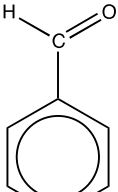
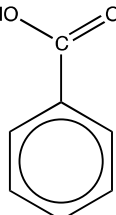
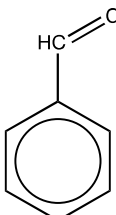
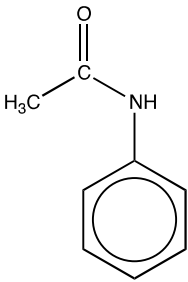
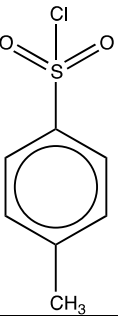
En química orgánica se conoce al benceno como compuesto aromático ya que cumple con una condición llamada aromaticidad que guarda relación con los 3 dobles enlaces que giran alrededor del anillo y la combinación de 2 estructuras resonantes. Por tanto los compuestos derivados del benceno son también compuestos aromáticos.

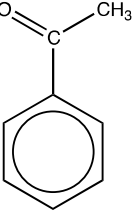
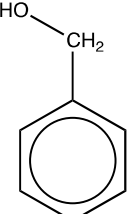
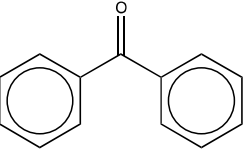
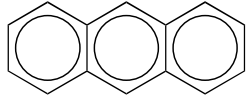
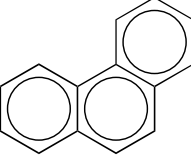
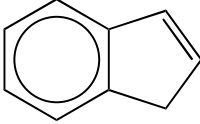
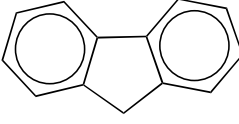


### Nomenclatura de compuestos aromáticos

Derivados monosustituídos del benceno se nombran de la misma forma que los hidrocarburos, pero usando *benceno* como sufijo. Para nombrar bencenos sustituidos por cadenas de carbono, existen 2 posibilidades, si la ramificación es pequeña (menor o igual a 6 carbonos) entonces se nombra como un benceno sustituido por el grupo de carbono, ejemplo propil*benceno*. Si el sustituyente tiene grande (más de 6 carbonos) entonces se nombrara como el sustituyente ramificado, y se usara la palabra *fenil* para denotar el benceno, ejemplo, 3-fenilheptano (Tabla 3).

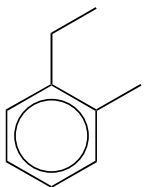
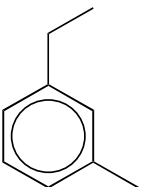
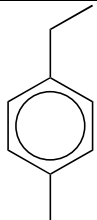
**Tabla 3. Estructuras y nombres comunes de compuestos aromáticos monosustituídos.**

			
Tolueno	Xileno (o-, m- y p-)	Bifenilo	Naftaleno
			
Fenol	Anisol	anilina	Benzaldehído
			
Ácido Benzoico	Estireno	Acetanilida	Cloruro de tosilo

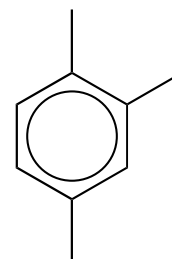
			
Acetofenona	Alcohol bencilico	Benzofenona	Antraceno
			
Fenantreno	Indeno	Fluoreno	

Los bencenos disustituídos se nombran utilizando los prefijos *orto-,meta-,para-* o simplemente *o-, m-, p-*; dependiendo del lugar en donde se encuentre la segunda sustitución más importante (Tabla 4).

**Tabla 4. Estructuras y nombres comunes de compuestos aromáticos disustituídos.**

		
o-etilmetilbenceno o-etiltolueno	m-etilmetilbenceno m-etiltolueno	p-etilmetilbenceno p-etiltolueno

Para casos en donde el anillo de benceno está enlazado con más de 2 sustituyentes (ver figura lateral), el compuesto se nombra utilizando números, al igual que en hidrocarburos cíclicos. Por ejemplo, 1,2,3-trimetilbenceno.







## 5. Grupos funcionales.

Los grupos funcionales son de vital importancia en química orgánica ya que es ahí donde ocurren muchas de las reacciones químicas. Anteriormente ya se conocieron 2 grupos funcionales, alquenos y alquinos, siendo el doble y triple enlace respectivamente el lugar donde ocurren las reacciones químicas para dichos hidrocarburos. A continuación se detallan grupos funcionales que presentan no solo carbono e hidrogeno, sino que también importantes elementos como nitrógeno, oxígeno y azufre.

### Aminas

#### Estructura

Las aminas son compuestos orgánicos que presentan átomos de nitrógeno en su estructura. Donde R representa cualquier cadena de carbonos, por tanto las aminas se pueden clasificar en primarias, secundarias o terciarias dependiendo de si está el nitrógeno enlazado a 1, 2 o 3 carbonos respectivamente.

$R-NH_2$	$R-NH-R$	$\begin{array}{c} R-N-R \\   \\ R \end{array}$
Amina primaria	Amina secundaria	Amina terciaria

#### Propiedades físicas

Las aminas son sustancias moderadamente polares, sus temperaturas de ebullición son mayores a la de los alcanos en general. Las aminas primarias forman puentes de hidrogeno entre si y con el agua, a diferencia de las terciarias que solamente pueden formar puentes de hidrogeno con el agua u algún otro compuesto químicamente similar, por consecuencia las aminas terciarias hierven a temperaturas menores de las aminas primarias.

#### Nomenclatura

Para nombrar las aminas, al final del compuesto se añade el sufijo amina. Por su parte en el caso de aminas secundarias y terciarias simétricas (que las cadenas de carbono son iguales) se utilizan los prefijos di y tri respectivamente.

	$\begin{array}{c} H_3C-N-CH_3 \\   \\ CH_3 \end{array}$
Dietilamina	trimetilamina

Por otro lado, para aminas secundarias y terciarias asimétricas (que los sustituyentes son distintos) se escoge el sustituyente con más carbonos y se asume el resto como sustituyentes del átomo de nitrógeno agregando el prefijo N-.



N-etilpropilamina	N-metil-2-butilamina	N-etil-N-metilpropilamina

## Amidas

### Estructura

Las amidas son compuestos orgánicos que presentan en su estructura los elementos: nitrógeno, carbono y oxígeno (Ver esquema, donde R representa cualquier cadena de carbonos). Las

Amida primaria	Amida Secundaria	Amida terciaria

amidas se pueden clasificar en primarias, secundarias o terciarias dependiendo de si está el nitrógeno enlazado a 1, 2 o 3 carbonos respectivamente.

### Propiedades físicas

El grupo funcional amida es bastante polar, lo que explica que las amidas primarias, excepto la formamida, sean todas sólidas y solubles en agua a temperatura ambiente. Sus puntos de ebullición son más altos que de otros compuestos con grupos funcionales, como ácidos carboxílicos, debido a una gran asociación intermolecular a través de puentes de hidrógeno. Los puntos de fusión y de ebullición de las amidas secundarias son bastante menores. Como es natural, las amidas terciarias (sin enlaces N—H) no pueden formar puentes de hidrógeno, por lo que son líquidos normales, entendiendo que sus puntos de fusión y de ebullición van de acuerdo con su peso molecular.

### Nomenclatura

Las amidas se nombran agregando la terminación amida, por su parte, si el nitrógeno de la amida se encuentra sustituido entonces se utiliza el prefijo N.

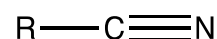
Formamida	2-metilpropanamida	N-metilbutanamida	N-etil-N-metil-3-metilbutanamida



## Nitrilos

### Estructura

Los nitrilos son compuestos que presentan en su estructura el grupo funcional CN, el cual es un sustituyente que solamente puede hacer un solo enlace (Ver figura lateral).



### Propiedades físicas

El enlace triple CN difiere bastante del enlace C—C, siendo levemente más fuerte y mucho más polarizado. La gran polaridad del enlace CN, se debe al dipolo  $C^+\equiv N^-$  y provoca que los nitrilos tengan puntos de ebullición bastante elevados (en relación con su peso molecular). Asimismo, son buenos disolventes de compuestos orgánicos polares, como ácidos carboxílicos, aldehídos y cetonas, etc., siendo a su vez relativamente solubles en agua.

### Nomenclatura

Para dar nombre a los nitrilos se escoge la cadena más larga que incluya al grupo funcional (tanto en posición como en número de carbonos) y se la agrega el sufijo *nitrilo*. El carbono N°1 es el nitrilo.

Pentanonitrilo	2-etilpentanonitrilo

## Alcoholes

### Estructura

Los alcoholes son compuestos orgánicos que presentan en su estructura un átomo de oxígeno y un átomo de hidrógeno. Los alcoholes se pueden clasificar en primarios secundarios o terciarios, dependiendo del número de sustituyentes que estén unidos al carbono que se encuentra sustituido por el grupo alcohol.

$R-C\begin{matrix} H_2 \\   \\ OH \end{matrix}$	$R-C\begin{matrix} OH \\   \\ H \\   \\ R \end{matrix}$	$R-C\begin{matrix} OH \\   \\ R \\   \\ R \end{matrix}$
Alcohol primario	Alcohol secundario	Alcohol terciario

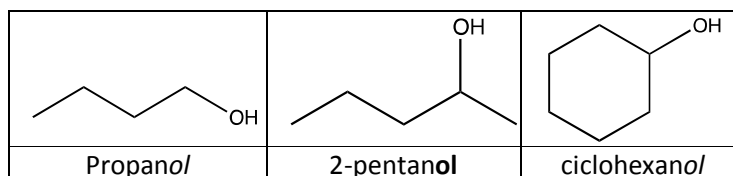
### Propiedades físicas

Los alcoholes primarios y secundarios son líquidos incoloros y de olor desagradable, solubles en el agua en cualquier proporción y menos densos que ella. Las propiedades físicas de los alcoholes están relacionados con el grupo -OH, que es muy polar y capaz de establecer puentes de hidrogeno, lo que le confiere puntos de ebullición más elevados que lo normal para compuestos de la misma masa molecular.



### Nomenclatura

La cadena principal debe contener al grupo funcional (-OH) indicando la posición del grupo funcional y agregando el sufijo *ol*.



### Éteres

#### Estructura

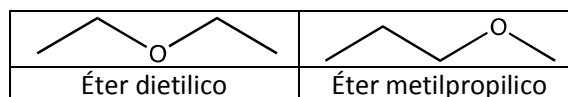
Los éteres son compuestos que presentan oxígeno entre 2 cadenas alquílicas de la forma  $R-O-R$ .

#### Propiedades físicas

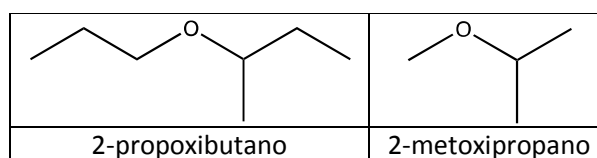
Los éteres presentan una polaridad débil la cual no afecta apreciablemente a los puntos de ebullición de estos, que son similares a los de los alcanos de pesos moleculares comparables y mucho más bajos que los de los alcoholes. Por otra parte, los éteres presentan una solubilidad en agua comparable a la de los alcoholes, producto el pequeño momento dipolar originado en torno al grupo funcional.

#### Nomenclatura

Para éteres simples se deben mencionar los sustituyentes orgánicos que constituyen el compuesto anteponiendo la palabra éter.



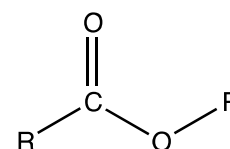
Éteres más complejos se nombran como sustituyentes de la cadena de carbonos más larga, separando ambas cadenas por la palabra *oxi*.



### Esteres

#### Estructura

Los esterres son derivados de ácidos carboxílicos, y su estructura está compuesta de un grupo carbonilo (C=O) y un grupo éter (R-O-R) (Ver Figura lateral)



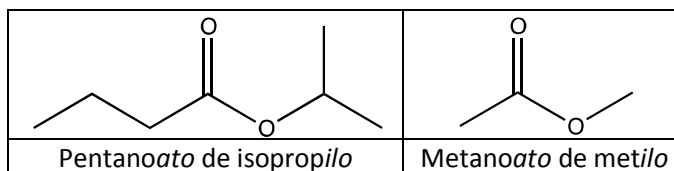


### Propiedades Físicas

El grupo carbonilo de los ésteres al ser un grupo altamente polarizado ( $^+C=O^-$ ) puede formar interacciones dipolares, pero al contrario de los alcoholes no puede llegar a formar puentes de hidrógeno por tanto sus puntos de ebullición son menores que la de los alcoholes de peso molecular similar, y en general son mucho menos solubles en compuestos polares que los alcoholes. Los ésteres presentan olores característicos debido a su volatilidad generada por sus puntos de ebullición no muy altos, como por ejemplo el etanoato de octilo que posee un característico olor a naranja, o el pentanoato de pentilo que tiene un fuerte olor a manzana.

### Nomenclatura

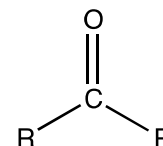
Los ésteres se nombran agregando la terminación *ato* para el grupo alquilo que contiene el carbonilo. Y al otro grupo alquilo que viene después del éter se agrega el sufijo *ilo*.



### Cetonas

#### Estructuras

Las cetonas son compuestos orgánicos que presentan en su estructura el grupo carbonilo ( $C=O$ ). En la estructural de una cetona, se puede notar la presencia del grupo carbonilo al medio de la estructura. (Figura lateral)

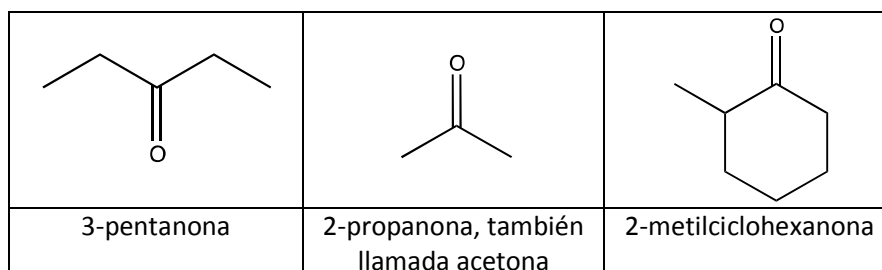


#### Propiedades Físicas

Las cetonas presentan puntos de ebullición más bajos que los alcoholes del mismo peso molecular ya que la polarización del grupo  $^+C=O^-$  no es tal como para formar fuertes interacciones dipolo – dipolo con sus moléculas vecinas.

#### Nomenclatura

Para nombrar a las cetonas se busca la cadena principal más larga que contenga el grupo funcional, asignándole el prefijo de posición y agregándole el sufijo *ona*.

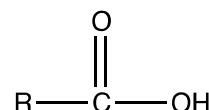




## Aldehídos

### Estructura

Los aldehídos son grupos orgánicos que presentan en un extremo de una cadena el grupo CHO. Como se puede notar en la figura lateral, el grupo carbonilo solamente puede estar en un extremo

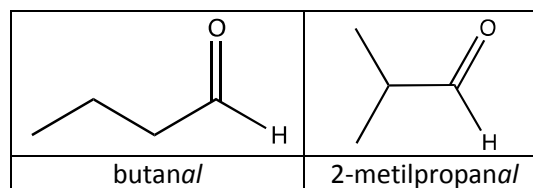


### Propiedades Físicas

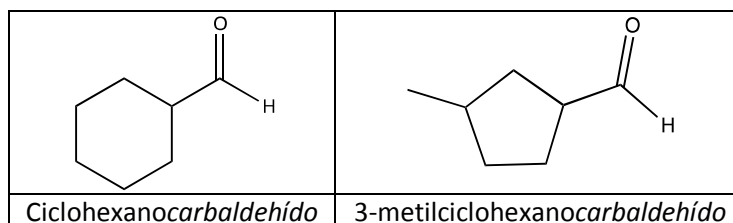
Al igual que las cetonas la presencia del grupo carbonilo hace que sean compuestos polares, ambos presentan puntos de ebullición similares, mucho más altos que los alcanos de igual peso molecular pero inferiores de alcoholes con similar peso molecular. Son solubles en agua al igual que en solventes orgánicos.

### Nomenclatura

Para nombrar los aldehídos el grupo debe estar contenido dentro de la cadena principal, y agregar el sufijo *al*, como el grupo siempre estará en un extremo de la cadena no es necesario indicar la posición ya que se entiende que es siempre la 1.



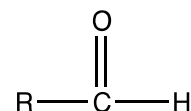
Los Aldehídos más complejos donde el grupo  $-\text{CHO}$  está enlazado a un anillo utilizan el sufijo *carbaldehído* en lugar de *al*.



## Ácidos Carboxílicos

### Estructura

Los ácidos carboxílicos son compuestos que poseen en su estructura el grupo  $-\text{COOH}$ . Como se puede apreciar en la figura lateral, al igual que los aldehídos el grupo  $-\text{COOH}$  es terminal.



### Propiedades Físicas

Los ácidos carboxílicos son compuestos altamente polares, estos al poseer un grupo carbonilo ( $-\text{CO}$ ) y un grupo alcohol ( $-\text{OH}$ ) tienen la capacidad de formar puentes de hidrógeno entre ellos lo cual hace que sean compuestos con elevados puntos de ebullición. Producto que son altamente solubles en solventes polares y poco solubles en solventes apolares.

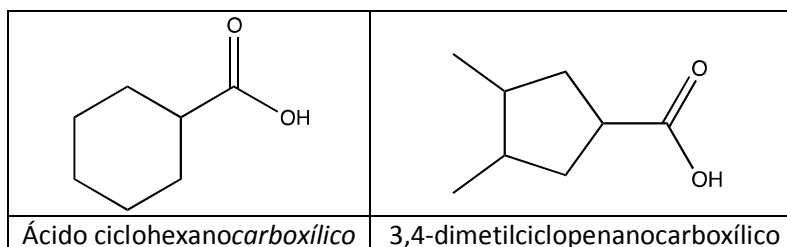


### Nomenclatura

Los ácidos carboxílicos se nombran buscando la cadena principal más larga que contenga el grupo funcional, anteponiendo la palabra ácido y agregando el sufijo oico. No es necesario agregar prefijos de posición ya que al ser un grupo terminal se entiende que la posición es 1.



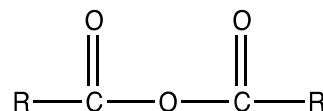
Para ácido más complejos donde el grupo –COOH se encuentra enlazado a un anillo se utiliza el sufijo carboxílico en lugar de oico.



### Anhídridos

#### Estructura

Los anhídridos son compuestos derivados de ácidos carboxílicos, los que presentan el grupo -OCOCO- (Figura lateral).

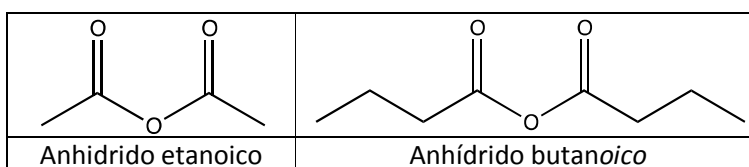


#### Propiedades Físicas

Los anhídridos de bajo peso molecular son líquidos y los de alto peso molecular son sólidos, en general no presentan punto de ebullición demasiado altos producto que no forman puentes de hidrógeno.

### Nomenclatura

Para nombrar anhídridos simétricos se nombran como ácido un ácido carboxílico pero reemplazando la palabra ácido por anhídrido.





Para anhídridos asimétricos se nombran anteponiendo la palabra anhídrido y se nombran ambas cadenas como ácidos.

Anhídrido metanoicopropanoico	Anhídrido isobutanoicopropanoico

## Halogenuros de Alquilo

### Estructura

Los halogenuros de alquilo, son compuestos que presentan un elemento halógeno en la estructura (como sustituyente). Los átomos de halógeno más comunes como sustituyentes son cloro (Cl), bromo (Br) y Yodo (I).

### Propiedades Físicas

Los halogenuros de alquilo presentan puntos de ebullición comparables a sus alcanos correspondientes aunque un poco más elevados producto de la presencia del átomo de halógeno. A medida que el halógeno aumenta su radio el punto de ebullición aumenta (Tabla 5).

**Tabla 5. Puntos de Ebullición y Masa Molecular de Halogenuros de Alquilo.**

Compuesto	Masa molecular	Punto de ebullición
$\text{CH}_3\text{-F}$	34	- 78° C
$\text{CH}_3\text{-Cl}$	50.5	- 24° C
$\text{CH}_3\text{-Br}$	95	4° C
$\text{CH}_3\text{-I}$	142	42° C

### Nomenclatura

Los halógenos se nombran como sustituyentes de la cadena principal anteponiendo el nombre del halógeno presente y su prefijo de posición.

2-bromobutano	2-yodo-4-metilpentano	fluorociclohexano





## Tioles

### Estructura

Los tioles o también llamados mercaptanos son análogos a los alcoholes con la diferencia que el grupo funcional tienen un átomo de azufre en lugar de un átomo de oxígeno. El grupo  $-SH$  también se le conoce con el nombre de mercapto.

### Propiedades físicas

Producto de los valores de electronegatividad tan cercanos entre el azufre y el hidrogeno (2,5 y 2,1 respectivamente) el enlace azufre-hidrogeno es prácticamente apolar, por tanto las interacciones que se producen con otras moléculas son sumamente débiles lo que se traduce en puntos de ebullición y fusión bajos.

### Nomenclatura

La nomenclatura de los tioles es similar a la de los alcoholes con la diferencia que la terminación es con la que se identifica el grupo funcional es *tiol*. Ejemplo.

etanotiol	2-propanotiol

## Tioeteres

### Estructuras

Los tioeteres son compuestos similares a los éteres con la diferencia que en lugar de un átomo de oxígeno hay un átomo de azufre, siguiendo esta estructura  $R-S-R$ .

### Propiedades Físicas

Las propiedades físicas de los tioeteres son similares a los de los tioles, teniendo lo tioeteres punto de ebullición y fusión un poco más elevados producto del momento dipolar pequeño que se forma alrededor del azufre.

### Nomenclatura

Para nombrar los tioeteres es igual que para nombrar éteres, pero cambiando la palabra oxi por *tio*.

Etiltioetano	Metiltioetano	propiltioetano



## Parte II. Bases de la Química Orgánica y Química Verde.

### 1. Introducción.

Durante las últimas décadas, la degradación ambiental se ha ido convirtiendo en un problema mundial. El desarrollo económico, tecnológico y social han puesto en jaque la preservación de la Tierra como lugar donde poder vivir, de modo que a partir de mediados de los años ochenta, la protección del medio ambiente ha pasado a ser un objetivo más del desarrollo, de no ser así, los excesos de contaminación y la sobreexplotación de recursos se convertirán, en un futuro, en la mayor barrera para el propio desarrollo.

En el año 1987 se presentó en la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo el documento *“Our Common Future”* o mejor conocido como *“Informe Bruntland”*, en el que se plantea un nuevo modelo de desarrollo que suponga el progreso humano sostenido no solamente en unos pocos lugares durante unos pocos años, sino para todo el planeta en un futuro lejano (WCED, 1987). Además en este documento se postula la que hoy consideramos primera definición de desarrollo sostenible: *“El desarrollo sostenible es aquel que satisface las necesidades actuales sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades, lo que incorpora dos conceptos clave: el concepto de “necesidades”, en particular las necesidades esenciales de los más pobres del mundo, a los que debe concederse la mayor prioridad, y la idea de limitaciones impuestas por el estado de la tecnología y la organización social sobre la capacidad del medio ambiente para satisfacer las necesidades presentes y futuras”*.

La primera parte de la definición, aunque restringida, es hoy en día reconocida como definición canónica del “Desarrollo Sostenible”, pero es en la segunda parte, la de los dos conceptos clave y en particular el segundo concepto, el que se ha considerado especialmente interesante en el ámbito científico, ya que cualquier tipo de desarrollo se entiende como un proceso de adaptación y aprendizaje, en el que el conocimiento debe tener un papel central. En el caso del desarrollo sostenible, la ciencia y la tecnología son decisivas para conseguir los requisitos que se establecen en las directrices de la sostenibilidad.

Por otro lado, la Química Verde se suele definir como la aplicación de la ciencia y la manufactura químicas de manera sustentable, segura, no contaminante, consumidora de cantidades mínimas de materia y energía y productora de poco o ningún material de desecho. Así pues, la química y la ingeniería química se pueden considerar verdes cuando modifican o rediseñan totalmente procesos y productos químicos, con el objetivo de minimizar los residuos y el uso o generación de materiales potencialmente peligrosos.



Si bien la definición de química verde es bastante concisa, en realidad se trata de una disciplina que está en continua evolución, ya que congrega un gran número de sub-disciplinas, que se aplican a la producción, el uso, el vertido y la disposición final de productos químicos, haciendo que se minimice el consumo de materiales, el daño ambiental, las sustancias tóxicas y ante todo la exposición de organismos vivos; además de buscar la rentabilidad económica. Es decir, la química verde es la forma más eficaz y menos costosa de la práctica química. El término “química verde” fue propuesto originalmente por Anastas y Warner en el libro *“Green chemistry: Theory and Practice”*. En él se incluyen los doce principios de la química verde que son hoy por hoy la clave para conseguir la sostenibilidad simultánea en los ámbitos medioambiental, económico y social.

El actual interés por la Química Verde refleja un cambio de rumbo desde la situación ambiental anterior, de “dominio y control” que implicaba un continuo tratamiento de residuos y un control bajo regulaciones, hacia la búsqueda de nuevas tecnologías mucho más limpias y económicamente rentables, basadas en la prevención. Con estas nuevas tendencias se pone de manifiesto el poder y la belleza que entraña la química, ya que es capaz de, a través de continuos y cuidados cambios, producir los productos que necesita la sociedad, pero salvaguardando el medio en el que se vive.

Es evidente que los beneficios económicos reportados por el desarrollo de la Química Verde son el sostén principal del propio desarrollo. Conforme se reducen los productos de desecho, el tratamiento de éstos así como su almacenamiento se hacen innecesarios y por tanto se reducen gastos. Evitar el uso de disolventes o reactivos intermedios aumenta la eficiencia material de los procesos<sup>7</sup> a la vez que los hace menos costosos y el empleo de catalizadores ofrece numerosos beneficios, entre otros un ahorro energético que indudablemente, tal y como están las cosas, es una gran contribución a la reducción de coste de los procesos industriales.

## **2. Principios de la Química Verde.**

Como se mencionó, la Química Verde o Sostenible corresponde al diseño de productos químicos y procesos que reducen o eliminan el uso y generación de sustancias nocivas o contaminantes. El término Green Chemistry fue introducido por Anastas (Anastas, 1998) y describe los esfuerzos de los químicos para desarrollar procesos y productos que prevengan la contaminación y que sean seguros tanto para los seres humanos como para el medio ambiente. El diseño de productos amigables con el medioambiente se guía por los doce principios de la química sostenible enunciados por Anastas y Warner.



### Los 12 Principios de la Química Verde.

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



### 3. Catálisis y catalizadores.

Los principios de la Química Verde consideran la catálisis una de las herramientas más importantes para la consecución de los objetivos marcados por los propios principios. El empleo de catalizadores en las reacciones químicas consigue que éstas se puedan llevar a cabo con menor aporte energético, que se aumente la selectividad y así que sean menores los residuos derivados del proceso y finalmente, que en general, los procesos sean menos tóxicos y más seguros.

La catálisis homogénea y la heterogénea son consideradas ámbitos diferentes de un mismo tema y de hecho tradicionalmente se han estudiado por separado. Mientras que los catalizadores homogéneos se preparan mediante síntesis orgánicas y tienen centros activos muy bien definidos, que permiten conocer perfectamente los mecanismos de reacción, los catalizadores heterogéneos necesitan de síntesis orgánico-inorgánicas que dan como resultado materiales sólidos con estructuras muy interesantes, pero mucho más complicadas de entender a nivel mecanístico. La tendencia actual en catálisis consiste en ir acercando poco a poco las dos vertientes.

Una forma de aproximación entre los dos ámbitos de la catálisis debe pasar por el diseño y la introducción de nuevos materiales que permitan aunar las ventajas de cada una de las vertientes catalíticas y a la vez reducir al máximo los inconvenientes que éstas puedan presentar.

### 4. Otras alternativas catalíticas: Los Líquidos Iónicos.

Dependiendo del punto de vista desde el cual se pretendan estudiar, los líquidos iónicos pueden ser clasificados como una nueva clase de disolventes o como un tipo de materiales con múltiples y muy diversas aplicaciones. Sin embargo la forma más aceptada de definirlos es como sales con temperatura de fusión por debajo de 100°C, que no deja de ser una definición bastante ambigua, pero al menos informa de su naturaleza completamente iónica y del estado en que se pueden encontrar según la temperatura a la que se vayan a utilizar. La principal característica que diferencia a los líquidos iónicos de las sales fundidas, es el amplio margen de temperaturas en el que los líquidos iónicos son líquidos comparados con las sales tradicionales.

Mucho más a menudo de lo que cabría esperar, se han confundido los términos o se han empleado indistintamente líquidos iónicos y sales fundidas, sin embargo las diferencias van mucho más allá del rango de temperaturas en el que son líquidos unos y sólidas las otras. Abordado desde la perspectiva química, la composición de los líquidos iónicos es especialmente consistente, aunque sus propiedades y componentes varían enormemente dentro del mismo tipo de materiales.



Los líquidos iónicos están constituidos por un catión orgánico y un anión inorgánico poliatómico en la mayoría de los casos, lo que hace que el número de líquidos iónicos sea indeterminado puesto que hay una enorme cantidad de cationes y aniones disponibles para generarlos. De hecho, desarrollar un nuevo líquido iónico es relativamente sencillo, quizás lo que complique el proceso es la caracterización físico-química del compuesto generado. Pero sin duda uno de los grandes méritos de los líquidos iónicos es que puedan ser sintetizados de acuerdo con las necesidades específicas del proceso al que posteriormente se vayan a aplicar. Es lo que se suele llamar síntesis “a medida” o “a la carta” de líquidos iónicos.

La historia comienza en el ejército estadounidense, más concretamente en la U.S. Air Force Academy, en 1963. El Mayor Lowell A. King encargado de un proyecto de investigación en pilas, trataba de encontrar sustitutos viables para las sales fundidas de LiCl-KCl, que por entonces se empleaban como electrolitos. Los cloroaluminatos, mezclas de haluros de alquilo y cloruro de aluminio, se fueron introduciendo en el campo de la electroquímica ya que conseguían temperaturas de fusión mucho más bajas de lo que se esperaba para este tipo de sales inorgánicas, además no se comportaban como simples mezclas binarias, el sistema que formaban y sus características ácido-base de Lewis proporcionaban una serie de aniones del tipo  $\text{Cl}^-$ ,  $[\text{AlCl}_4]^-$ ,  $[\text{Al}_2\text{Cl}_7]^-$  y  $[\text{Al}_2\text{Cl}_{10}]^-$ . Uno de los ejemplos de cloroaluminatos que más ampliamente se estudió y que tuvo inmediatamente una aplicación en forma de electrolitos para pilas, fue la mezcla eutéctica NaCl-AlCl<sub>3</sub>, con una temperatura de fusión de 107°C (curiosamente cercana a la de un líquido iónico).

A raíz del potencial demostrado por algunas sales de aluminio para ser aplicadas en la fabricación de pilas, los investigadores encontraron una patente en la que se describía una mezcla conductiva constituida por AlCl<sub>3</sub> y haluros de 1-etilpiridinio. Posteriormente se encontró un mejor comportamiento en la mezcla pseudo-binaria cloruro de 1-butilpiridinio-AlCl<sub>3</sub>. Su descubrimiento y caracterización se publicó en 1978, y se considera en la actualidad la primera muestra de líquido iónico. A partir de esa publicación y de su consiguiente patente, químicos e ingenieros de todo el mundo comenzaron a mostrar interés por lo que, en principio, se consideraron disolventes totalmente iónicos no acuosos.

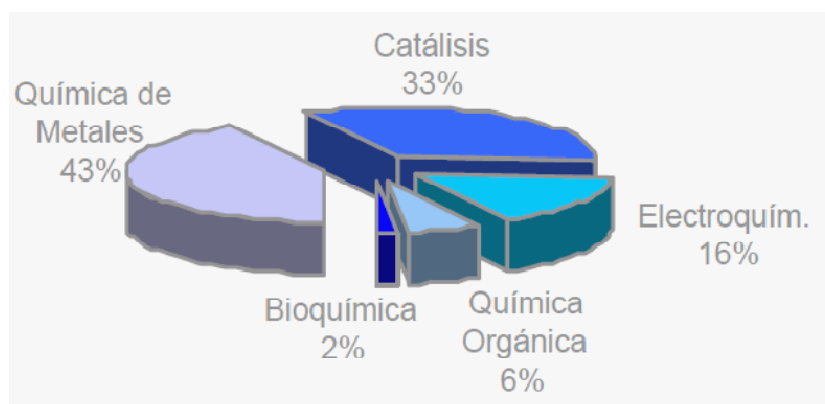
Conforme se amplió su aplicación, y tras varios intentos, se consiguió la clase de cationes del tipo dialquilimidazolio, y en particular 1-etil-3-metilimidazolio, [Emim]<sup>+</sup>. El cloruro de 1-etil-3-metilimidazolio [Emim]Cl mezclado con AlCl<sub>3</sub> dio lugar a un líquido iónico con temperatura de fusión por debajo de los 25°C. Sin lugar a dudas, las propiedades de este nuevo material abrían una perspectiva ideal para su aplicación como electrolito en pilas, pero además se empezó a vislumbrar la posibilidad de aplicarlo en reacciones orgánicas como Friedel-Crafts, demostrándose así, que no solo era idóneo para su empleo en electroquímica sino que además podía comenzar a emplearse en otros ámbitos ya no solo como disolvente sino también como catalizador.



Aun cuando solo se veían ventajas, se hizo evidente que los líquidos iónicos sintetizados hasta entonces, basados en cloroaluminatos de piridinio e imidazolio tenían la desventaja de ser especialmente reactivos con el agua, así fue como desde 1990 se comenzó a desarrollar, sintetizar y caracterizar completamente sales con dialquilimidazolio como catión, pero que dispusieran de aniones estables en agua. El trabajo en el laboratorio se hizo sencillo, dejó de ser necesario trabajar en atmósfera exenta de humedad. Las nuevas sales, con aniones del tipo: tetrafluoroborato, hexafluorofosfato, nitrato, sulfato y acetato, demostraron ser mucho más estables a la hidrólisis, al menos a temperaturas bajas, y aunque el propósito inicial era emplearlas de nuevo como electrolitos en pilas, resultaron ser especialmente útiles en otras aplicaciones.

Nuevos colaboradores, comenzaron a ampliar el catálogo de líquidos iónicos estables en agua, a desarrollar nuevos procesos de síntesis y a caracterizar mucho más profusamente tanto los de nueva generación como los líquidos iónicos ya existentes. Fuller sintetizó nuevas series de líquidos iónicos con cationes de monoalquilimidazolios y trialquilimidazolios y combinó estos cationes con los aniones estables en agua que había desarrollado años atrás, más una serie adicional de aniones del tipo: bromuros, cianuros, bisulfuros, yoduros, sulfonatos, tosilatos, tartratos, etc. Es evidente que esto dio como resultado una cantidad ingente de combinaciones y de posibles líquidos iónicos con un rango de tamaños muy grande y posibilidades de aplicación casi infinitas. Hoy en día el catálogo de cationes y aniones es todavía mayor, lo que hace que la posibilidad de crear nuevos líquidos iónicos, prácticamente no tenga acotaciones y que las aplicaciones de éstos estén tan solo limitadas por nuestra propia imaginación.

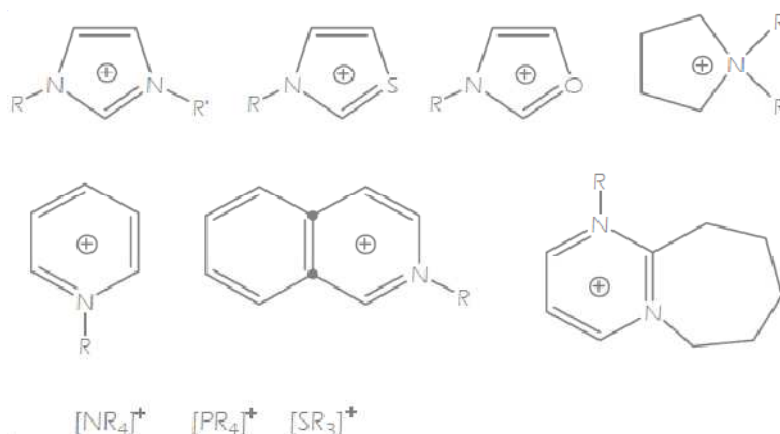
Aunque originalmente se usaron de forma exclusiva en electroquímica con aplicaciones muy limitadas, poco a poco se han ido ampliando las expectativas, haciendo que los líquidos iónicos estén ya presentes en muchos campos de la química, tal y como se puede apreciar en la Figura 12. Cabe destacar que no solo la química se aprovecha de ellos, más adelante se comentarán otros ámbitos en los que se están aplicando.



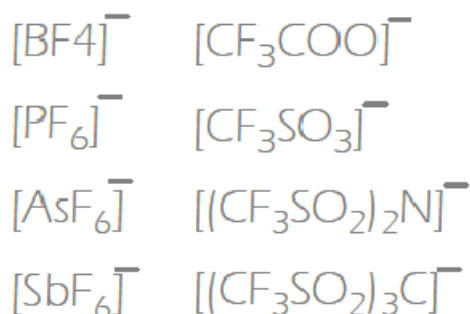
**Figura 12. Aplicaciones de los Líquidos Iónicos**

## 5. Síntesis de Líquidos Iónicos.

La síntesis de líquidos iónicos se suele dividir en dos pasos: el primero consiste en la formación del catión y el segundo en el intercambio del anión según las necesidades específicas. En muchas ocasiones, el primer paso es suficiente para obtener el producto deseado ya que es fácil encontrar un precursor del anión que pueda a la vez, mediante adición, generar el catión. En otros casos el catión que se necesita está disponible comercialmente y por lo tanto es suficiente con el intercambio aniónico. Entre los líquidos iónicos más sintetizados se encuentran los derivados del catión 1,3-dialquilimidazolio, debido a sus interesantes propiedades. No obstante, las técnicas de síntesis pueden ser igualmente empleadas para muchos otros tipos de cationes y aniones, algunos de los cuales se muestran en las Figuras 13 y 14.



**Figura 13.** Cationes comúnmente utilizados para formar Líquidos Iónicos.



**Figura 14.** Aniones comúnmente utilizados para formar Líquidos Iónicos.





## 6. Propiedades de los Líquidos Iónicos.

En general, las propiedades de los líquidos iónicos están totalmente condicionadas por el catión y el anión que constituyen cada uno de ellos. Existe una inmensa variedad de posibilidades a la hora de escoger el medio apropiado para una reacción, tan solo se deben tener claros los condicionantes de ésta para establecer cuáles deben ser los componentes del líquido iónico a emplear. Siendo así, no es de extrañar que estos compuestos, sean denominados “disolventes de diseño”. Sería un trabajo titánico intentar detallar las propiedades de cada uno de los líquidos iónicos en este apartado, pero al menos se intentará aclarar las relaciones existentes entre las diferentes estructuras básicas y sus propiedades físicas y químicas más importantes.

### Puntos de fusión.

Por definición, los líquidos iónicos están completamente ligados a sus puntos de fusión, que a la vez, como en todo compuesto químico está íntimamente relacionado con su estructura. Si se comparan los puntos de fusión de distintas sales de cloruro (Tabla 1.3), se aprecia una clara influencia del catión. Las sales de metales alcalinos tienen puntos de fusión muy altos, mientras que las de cationes orgánicos funden a temperaturas por debajo de 130°C.

**Tabla 6. Temperatura de Fusión de algunas sales de cloro.**

Sal de cloruro	T <sup>º</sup> Fusión (°C)
NaCl	803
KCl	772
$\left[ \begin{array}{c} \text{N} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{R} \quad \text{N} \quad \text{R}' \end{array} \right]^+ \text{Cl}^-$	R = R' = CH <sub>3</sub> ([Mmin]Cl) 125 R = CH <sub>3</sub> , R' = CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> ([Emim]Cl) 87 R = CH <sub>3</sub> , R' = CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> ([Bmim]Cl) 65

Para líquidos iónicos, los puntos de fusión bajos se explican teniendo en cuenta por una parte, algunas características catiónicas como la poca simetría (que impide la compactación efectiva de la red cristalina), las débiles interacciones intermoleculares (debido al elevado tamaño de los iones y por lo tanto a la débil atracción anión-catión) y la eficaz distribución de cargas en el propio ion. Por otra parte, algunas características aniónicas, en la mayoría de los casos un aumento en el tamaño del anión, provoca la reducción del punto de fusión ya que la atracción entre los iones es menor lo que finalmente provoca un mayor carácter covalente (Tabla 7).



**Tabla 7. Temperatura de Fusión de Líquidos Iónicos con [Emim] como catión.**

Sal de imidazolio	T <sup>a</sup> Fusión (°C)
[Emim]Cl	87
[Emim]NO <sub>2</sub>	55
[Emim]NO <sub>3</sub>	38
[Emim]AlCl <sub>4</sub>	7
[Emim]BF <sub>4</sub>	6
[Emim]CF <sub>3</sub> CO <sub>2</sub>	-9
[Emim]CF <sub>3</sub> CO <sub>2</sub>	-14

De la anterior tabla se puede apreciar el amplio rango de puntos de fusión que puede tener un catión, según el anión con el que forme el líquido iónico. La contribución catiónica y aniónica en el punto de fusión de estos compuestos nunca debe considerarse de forma aislada, las interacciones que los mantienen juntos son las que gobiernan las características finales de los líquidos iónicos.

#### **Estabilidad térmica y Presión de vapor.**

Una de las características más importante de los líquidos iónicos es su baja presión de vapor. Esto es especialmente importante en los procesos de ingeniería ya que facilitan la separación por destilación de los productos de reacción, a la vez que evitan por completo la formación de azeótropos entre disolventes y productos. No obstante, dado que los líquidos iónicos pueden contener partes orgánicas, su estabilidad térmica es limitada. Dependiendo del proceso de síntesis y de la composición catiónica se puede trabajar dentro de un rango considerablemente amplio de temperaturas, La naturaleza del anión también tiene influencia en la estabilidad térmica del líquido iónico, así se observa que cuanto menor carácter nucleofílico tenga, más estable será el líquido iónico a altas temperaturas. El orden de estabilidad para algunos aniones convencionales sería: Cl<sup>-</sup> < [BF<sub>4</sub>]<sup>-</sup> ~ [PF<sub>6</sub>]<sup>-</sup> < [NTf<sub>2</sub>]<sup>-</sup>.

#### **Solubilidad, Miscibilidad y Solvatación**

Como se ha manifestado en otras ocasiones, la solubilidad es una propiedad que está directamente relacionada con la polaridad, no solo en los líquidos iónicos sino en cualquier disolvente.



En ese sentido, el concepto de solubilidad se tratará desde la perspectiva de cuan solubles son otros compuestos o solventes en relación a los líquidos iónicos. La solubilidad del agua en los líquidos iónicos puede variar desde la completa miscibilidad hasta la completa inmiscibilidad, tan solo con la variación del anión, por ejemplo de  $\text{Cl}^-$  (completamente miscible) a  $[\text{PF}_6]^-$  (completamente inmiscible), todo depende de la capacidad que tenga cada anión de generar enlaces puente de hidrógeno entre cada una de las especies presentes en el medio.

Los alcanos y por lo general las moléculas orgánicas apolares no son miscibles en los líquidos iónicos, por eso suelen utilizarse para generar sistemas bifásicos de reacción (es algo que también se hace con el agua). La solubilidad de compuestos orgánicos polares y de sales metálicas en líquidos iónicos es un campo muy estudiado por la relevancia que tienen esos sistemas en la síntesis química, especialmente en procesos catalíticos. Las diferentes solubilidades de reactivos, productos y catalizadores, hacen que la metodología de separación y purificación sea extremadamente eficaz. En la Tabla 8 se muestran algunos ejemplos de solubilidad de diferentes disolventes en tres líquidos iónicos.

**Tabla 8. Miscibilidad de varios disolventes en  $[\text{Bmim}]\text{PF}_6$ ,  $[\text{Bmim}]\text{Cl}-\text{AlCl}_3$  y  $[\text{Bmim}]\text{Cl}-\text{Al}_2\text{Cl}_6$ .  
M: Completamente miscible, R: Reactivos, I: Completamente inmiscible.**

Disolvente	$[\text{Bmim}]\text{PF}_6$	$[\text{Bmim}]\text{Cl}-\text{AlCl}_3$	$[\text{Bmim}]\text{Cl}-\text{Al}_2\text{Cl}_6$
Agua	I	R	R
Metanol	M	R	R
Acetonitrilo	M	M	M
Acetona	M	M	R
Tetrahidrofurano	M	M	R
Dióxido de carbono	I	I	I
Tolueno	I	I	I
Hexano	I	I	I

### Potencial electroquímico y Conductividad

Inicialmente los líquidos iónicos fueron desarrollados como disolventes para aplicaciones electroquímicas. Las características que los hacen especialmente indicados para estas aplicaciones son: (i) el amplio rango de potenciales electroquímicos, (ii) la elevada conductividad iónica y térmica, (iii) la efectividad en los fenómenos de transporte y (iv) la capacidad de solvatar moléculas de casi cualquier tipo.



La propiedad que se debe tener en cuenta en la elección de un medio de reacción para investigaciones electroquímicas es su estabilidad frente a los procesos de reducción y oxidación. En el caso de los líquidos iónicos, el rango en el que se puede trabajar depende de la resistencia del catión a la reducción y del anión a la oxidación. Además, es muy importante controlar las impurezas que puedan tener, (especialmente las de haluros y agua), pues afectan drásticamente reduciendo los potenciales redox de estos disolventes.

Por su parte la conductividad iónica de los disolventes, informa de la movilidad de los iones que transportan las cargas. En principio, cabe pensar que los líquidos iónicos, por estar constituidos por iones, poseerán una alta conductividad y así es si se comparan con las conductividades de sistemas de electrolitos/disolventes no acuosos. Sin embargo, son menos conductivos que las disoluciones acuosas concentradas de electrolitos, lo que puede atribuirse a los grandes tamaños de los iones, que limitan la movilidad de las cargas.

### **Toxicidad**

Se han realizado diferentes ensayos y estudios para determinar la toxicidad y la biodegradabilidad de los líquidos iónicos. En ellos se muestra que algunos pueden ser tóxicos, mientras que otros son completamente inofensivos y biodegradables. Sin embargo, un número bastante alto de los líquidos iónicos investigados son irritantes y tienen una toxicidad comparable a la de los disolventes orgánicos convencionales, pero con la ventaja de que no son volátiles, de modo que se reducen las potenciales vías de exposición, siendo el contacto directo con la piel y la ingestión prácticamente las únicas vías posibles. Los ensayos realizados "in vitro" dan indicaciones del peligro potencial, pero no implican que deba haber efecto sobre un organismo completo. Para profundizar más en los efectos, hay que estudiar fenómenos de transporte a través de las membranas biológicas y fenómenos de bioacumulación.

## **7. Aplicaciones de los Líquidos Iónicos**

Hoy en día existen numerosos ejemplos en los que se emplean líquidos iónicos como catalizadores, soportes o intermedios de reacción, ya sea para la investigación como para la industria. Es interesante remarcar en este punto los innovadores recursos que pusieron de manifiesto las compañías que accedieron a adentrarse en el inexplorado mundo del diseño de plantas industriales empleando líquidos iónicos. En la mayoría de los casos, los resultados superan con mucho las expectativas creadas.

En cuanto a la industria, en la Tabla 9 se presentan algunas de las aplicaciones que se están probando en planta piloto o que ya llevan unos cuantos años funcionando, así como las empresas que las han hecho posibles.



**Tabla 9. Aplicaciones de Líquidos Iónicos en la Industria.**

Empresa	Proceso	Acción del LI.	Escala aplicación
BASF	Eliminación de ácidos	Auxiliar	Comercial
	Destilación extractiva	Extractor	Planta Piloto
	Cloración	Disolvente	Comercial
IIP	Dimerización de olefinas	Disolvente	Planta Piloto
Degussa	Hidrosililación	Disolvente	Planta Piloto
	Compatibilización	Aditivo	Comercial
Arkema	Fluoración	Disolvente	Planta Piloto
Chevron Phillips	Oligomerización de olefinas	Catalizador	Planta Piloto
Scionix	Electrólisis (Cr)	Electrolito	Planta Piloto
Eli Lilly	Escisión de éteres	Catalizador/Reactivo	Planta Piloto
Air Products	Almacenamiento de gases	Soporte de líquidos	Planta Piloto
Iolitec/Wandres	Limpieza de fluidos	Aditivo	Comercial
Linde	Compresión de gases	Pistón para líquidos	Planta Piloto
Solar Millennium	Acumulador energético	Disolvente/Reactivo	Comercial

## 8. Los Líquidos Iónicos como catalizadores.

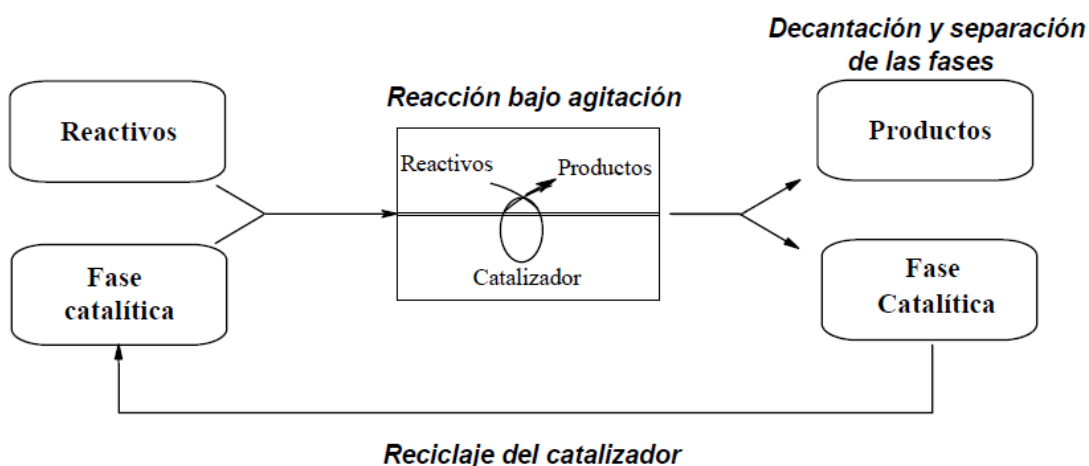
La catálisis es una disciplina que ha sido fundamental para el desarrollo de la industria química ya que más del 80% de los productos químicos manufacturados se obtienen mediante procesos que requieren el empleo de un catalizador al menos en una de las etapas. Actualmente, casi el 80% de las reacciones catalíticas industriales utilizan catalizadores heterogéneos (catalizador en un estado diferente de la reacción, por ejemplo, catalizador sólido y medio de reacción líquido) frente al 20% que utilizan sistemas homogéneos (tanto el catalizador como el medio de reacción en la misma fase).

Sin embargo, en la segunda mitad del siglo XX el interés hacia la catálisis homogénea ha aumentado notablemente de una manera paralela al desarrollo de la química organometálica. La principal ventaja de la catálisis heterogénea frente a la homogénea es la fácil separación del catalizador de los productos de reacción. Sin embargo, la catálisis homogénea tiene un gran potencial que hará, sin duda, que aumente su utilización práctica en el futuro.



Por ejemplo, la catálisis homogénea con complejos de metales de transición presenta la posibilidad de modelar a nivel molecular las propiedades de la especie catalítica incidiendo particularmente en los ligandos que constituyen la esfera de coordinación del metal, lo que conduce a reacciones más selectivas en condiciones más suaves. Además, permite entender mejor los mecanismos de reacción a escala molecular. El principal problema de la catálisis homogénea que limita su aplicación a escala industrial es la separación de los productos de reacción del catalizador y su recuperación cuantitativa en su forma activa. Esta separación se efectúa habitualmente por destilación, lo que provoca en la mayoría de los casos la degradación de una parte de los productos en compuestos pesados, por polimerización, que quedan en la fase catalítica y pueden causar la inactivación del catalizador. Otra alternativa consiste en someter el catalizador a una secuencia de modificaciones químicas y de extracciones, pero en este caso, se observan a menudo pérdidas del metal.

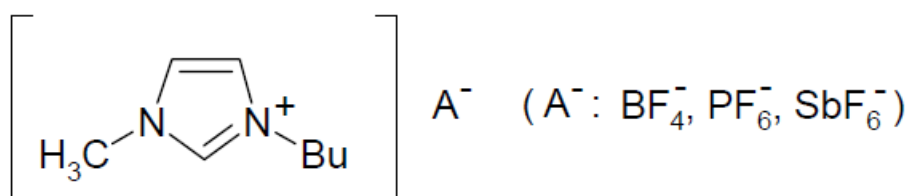
La solución más eficaz hasta el momento y que se ha aplicado en muchos procesos a escala industrial es la catálisis bifásica. Esta tiene como principio el uso de dos disolventes no miscibles, de tal manera que el sistema catalítico queda atrapado en una de las fases (orgánica polar, fluorada, líquidos iónicos o acuosa) por unos ligandos adecuados, y los reactivos y los productos se encuentran en la otra fase (en la mayoría de los casos un disolvente orgánico). Así, y simplemente por decantación, las dos fases se separan fácilmente y el sistema catalítico se puede reciclar (Esquema 2). Puesto que las dos fases no son miscibles, la reacción se efectúa en la interfase y/o dentro de la fase catalítica y necesita generalmente una agitación vigorosa.



Esquema 2. Ciclo de funcionamiento de un catalizador.



Una de las opciones de catálisis bifásica se produce en el sistema disolvente orgánico/líquidos iónicos. En este sistema se usa como segunda fase inmiscible con el disolvente orgánico, una fase constituida por líquidos iónicos. Algunos de los más líquidos iónicos mas utilizados son sales de imidazolio como 1-butil-3-metilimidazolio ( $\text{Bmim}^+$ ) (Figura 15) o también cationes tetraalquilamonio, tetraalquilfosfonio, trialquilsulfonio, N-alquilpiridinio o pirazolio, con aniones fluorados.



**Figura 15. Cation [Bmim] y aniones fluorados usados en catálisis bifásica.**

Los líquidos iónicos son unos excelentes disolventes de las especies iónicas. Así, mientras que los catalizadores iónicos se pueden inmovilizar directamente en esta fase sin necesidad de ligandos específicos, los complejos neutros deben coordinarse a ligandos polares o cargados para mantenerlos en la solución de las sales iónicas.

En síntesis, se puede decir que los Líquidos Iónicos corresponden a especies químicas conformadas por aniones y cationes muchos de los cuales son moléculas orgánicas cargadas. Estas moléculas, no solo están compuestas por cadenas hidrocarbonadas, sino que también por varios grupos funcionales, entre estos, carbonilos, alcoholes, dobles y triples enlaces, entre otros.

Esta variedad de grupos funcionales y estructuras le permiten contar, a los líquidos iónicos, con características que los diferencian diametralmente de otros solventes convencionales. Estas propiedades permiten actuar a los líquidos iónicos no solo como solventes sino que también como reactivos y mejor aun, como catalizadores. Esto implica que tales sales (líquidas) puedan cumplir en gran medida con lo propuesto por los principios de la química verde, en cuanto a reducir la cantidad de solventes utilizados, promoviendo el uso de sustancias auxiliares que permitan reducir los requerimientos energéticos (catalizadores) y también los residuos producidos (reutilización de solventes).

Como ejemplo de lo anterior, es la formación de biodiesel por medio de Líquidos Iónicos, donde estos actúan como catalizadores (Figura 16). Y por otro lado, otro de los usos de los líquidos iónicos en la actualidad, es la captura de  $\text{CO}_2$  atmosférico (contribuyendo con la disminución de formación de gases de efecto invernadero) el cual puede ser usado para formar otros compuestos orgánicos, tales como la urea (Figura 17).

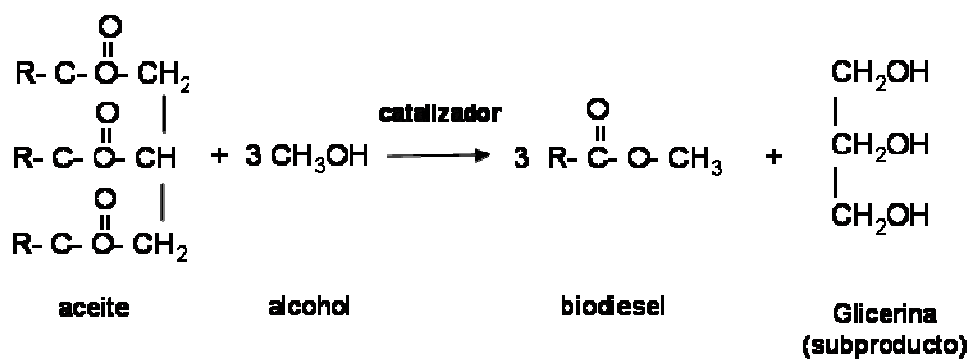


Figura 16. Formación de Biodiesel a partir de compuestos orgánicos.

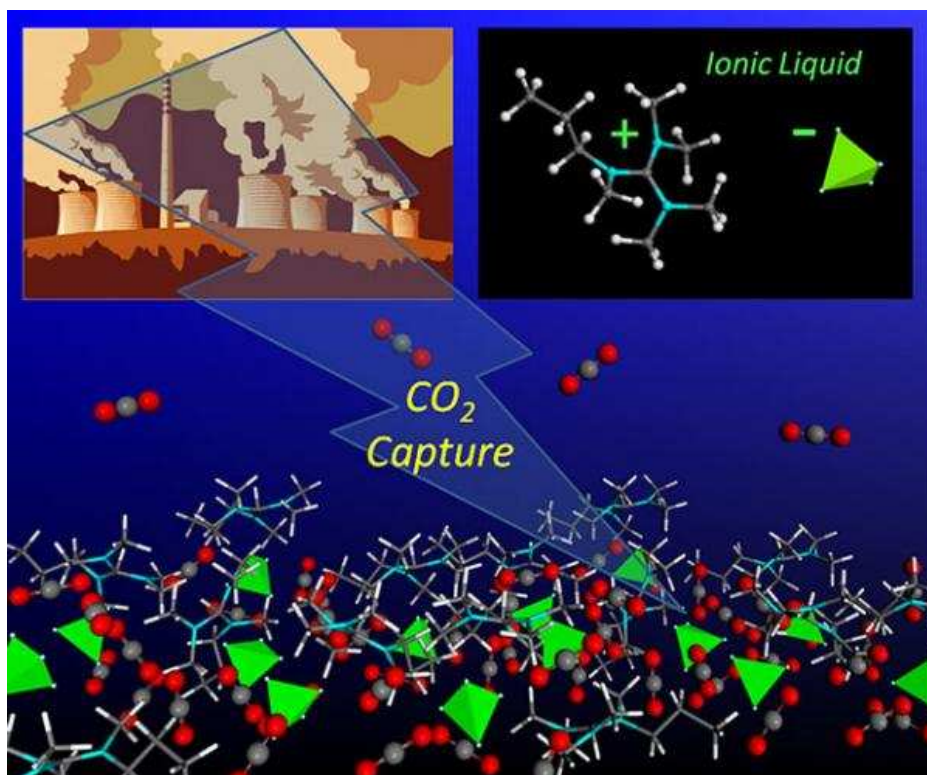


Figura 17. Captura de CO<sub>2</sub> por medio de Líquidos Iónicos.





### Parte III. Trabajo Práctico.

#### 1. Objetivos de la actividad.

- Comprender las características del Carbono.
- Conocer y entender las implicancias derivadas de la química del Carbono.
- Conocer: los distintos grupos funcionales, como estos son parte de los Líquidos Iónicos y como las propiedades de estos permiten cumplir con los principios de la Química Verde.

#### 2. Conceptos asociados en la actividad.

- Configuración electrónica e hibridación del Carbono.
- Grupos funcionales y Líquidos Iónicos.
- Líquidos iónicos y catálisis.

#### 3. Materiales y reactivos.

Este trabajo práctico se debe realizar en grupos de 3 ó 4 personas. Cada uno de los cuales contará con una bandeja de materiales necesarios para el desarrollo de la experiencia. Los reactivos e insumos serán entregados por los docentes, esto con el fin de que dentro de lo posible que no se generen gastos excesivos para no tener mayores desechos.

Es conveniente tener un mesón con todos los reactivos e insumos, y con los materiales necesarios para que puedan retirar los insumos del práctico. A su vez, es necesario recalcar que este trabajo práctico cuenta con tres partes independientes entre sí, razón por la cual se sugiere comenzar por la que reviste mayor tiempo de preparación inicial.

#### Materiales y Reactivos.

##### Actividad 1.

- |  |            |
|--|------------|
| 1. Plato de plástico.                  | [1 Unidad] |
| 2. Huevo.                              | [1 Unidad] |
| 3. Alcohol etílico (para desinfectar). | [50 mL]    |



#### Actividad 2.

1. Vaso de Precipitado de 100 mL. [1 Unidad]
2. Azúcar granulada. [1 Sobre]
3. Acido sulfúrico concentrado. [20 mL]

#### Actividad 3.

1. Cuchara de Metal. [1 Unidad]
2. Mechero de Alcohol. [1 Unidad]
3. Azúcar. [1 Sobre]
4. Ceniza de Carbón (o de Cigarros). [1 Sobre]

### 4. Metodología.

#### Actividad I. (Comenzar por esta actividad)

1. Romper un huevo y ponerlo sobre el plato de plástico.
2. Rociar sobre el huevo los 50 mL de alcohol.
3. Observar que le ocurre al huevo.
4. Dejar reposar aproximadamente 30 minutos.
5. ¿Qué le sucedió al huevo?

#### Actividad II.

1. Agregar dentro del vaso de precipitado, todo el azúcar del sobre.
2. Agregar sobre el azúcar los 20 mL de ácido sulfúrico.
3. Observar que ocurre.
4. ¿Qué le sucedió al azúcar?, ¿Por qué queda negro?, ¿qué es el gas que sale?

#### Actividad III.

1. Encienda el mechero de alcohol.
2. Con la cuchara metálica tome  $\frac{1}{2}$  cucharada de azúcar granulada.
3. Acerque la cuchara con azúcar a la flama del mechero.
4. Observe: ¿qué sucedió con el azúcar? ¿Ardió el azúcar?
5. Limpie la cuchara.
6. Ponga sobre la cuchara un poco de cenizas.
7. Ponga sobre las cenizas la misma cantidad de azúcar tomada anteriormente.
8. Vuelva a acercar la cuchara a la flama.
9. Observe: ¿Qué sucede ahora? ¿Por qué sucedió esto?



**Parte III. Ficha de trabajo.**

- 1. Observaciones sustraídas de la actividad.**
- 2. Explicación de las observaciones.**
- 3. Principio de la Química Verde abordado.**
- 4. Aprendizajes obtenidos. Conclusiones preliminares.**
- 5. Preguntas y Cuestionamientos.**



## Referencias.

1. Anastas, P.T. y Warner, J.C. (1998). Green Chemistry: Theory and Practice. Ed. Oxford.
2. Anastas, P.T. y Kirchoff, M.M. (2002). Origin, Current Status, and Challenges of Green Chemistry. *Acc. Chem. Res.* 35: 686-694.
3. Warner, J.C., Cannon, A.S. y Dye, K.M. (2004). Green Chemistry. *Environmental Impact Assessment Review.* 24: 755-799.
4. Lancaster, M. (2002) Green Chemistry: an Introductory text. Ed. Royal Society of Chemistry.
5. Química. La ciencia central T.L. Brown, H.E. LeMay Jr., B.E. Bursten, C.J. Murphy, P. Woodward . Ed. Pearson, 11ª Edición, 2009.
6. Química, R. Chang, Ed. Mc Graw Hill, 10ª Edición, 2010.
7. Química General R.H. Petrucci, W.S. Harwood, F.G. Herring, Ed. Pearson Educación (Prentice Hall), 8ª Edición, 2003.
8. Introducción a la nomenclatura de sustancias químicas, W.R. Peterson., Ed. Reverte, 2010.
9. Técnicas experimentales en Síntesis Orgánica, M.A Martínez Grau, A. G. Csáky. Ed. Síntesis.
10. a b W.P. Jencks, "Catalysis in Chemistry and Enzymology" McGraw-Hill, New York, 1969. ISBN 0-07-032305-4
11. Myron L Bender, Makoto Komiyama, Raymond J Bergeron "The Bioorganic Chemistry of Enzymatic Catalysis" Wiley-Interscience, Hoboken, U.S., 1984 ISBN 0-471-05991-9
12. The 12 Principles of Green Chemistry. United States Environmental Protection Agency.
13. «Genie in a Bottle». University of Minnesota.
14. Masel, Richard I. "Chemical Kinetics and Catalysis" Wiley-Interscience, New York, 2001. ISBN 0-471-24197-0.
15. Chemical & Engineering News, 16 February 2009, "Making Water Step by Step", p. 10
16. Robertson, A.J.B. Catalysis of Gas Reactions by Metals. Logos Press, London, 1970.
17. Helmut Knözinger, Karl Kochloefl "Heterogeneous Catalysis and Solid Catalysts" in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry 2002, Wiley-VCH, Weinheim. doi 10.1002/14356007.a05\_313. Article Online Posting Date: January 15, 2003
18. Arno Behr "Organometallic Compounds and Homogeneous Catalysis" Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 2002, Wiley-VCH, Weinheim. Doi 10.1002/14356007.a18\_215.