

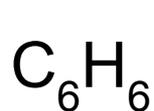
---

# UNIDAD 3

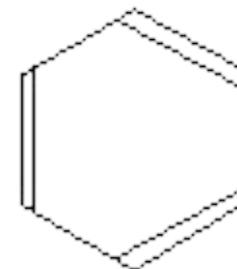
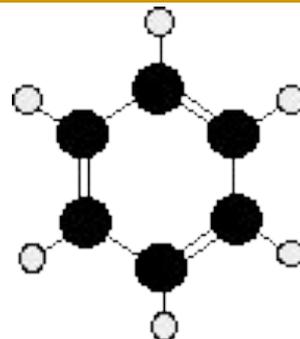
---

AROMATICIDAD Y SUSTITUCIÓN  
ELECTROFÍLICA AROMÁTICA

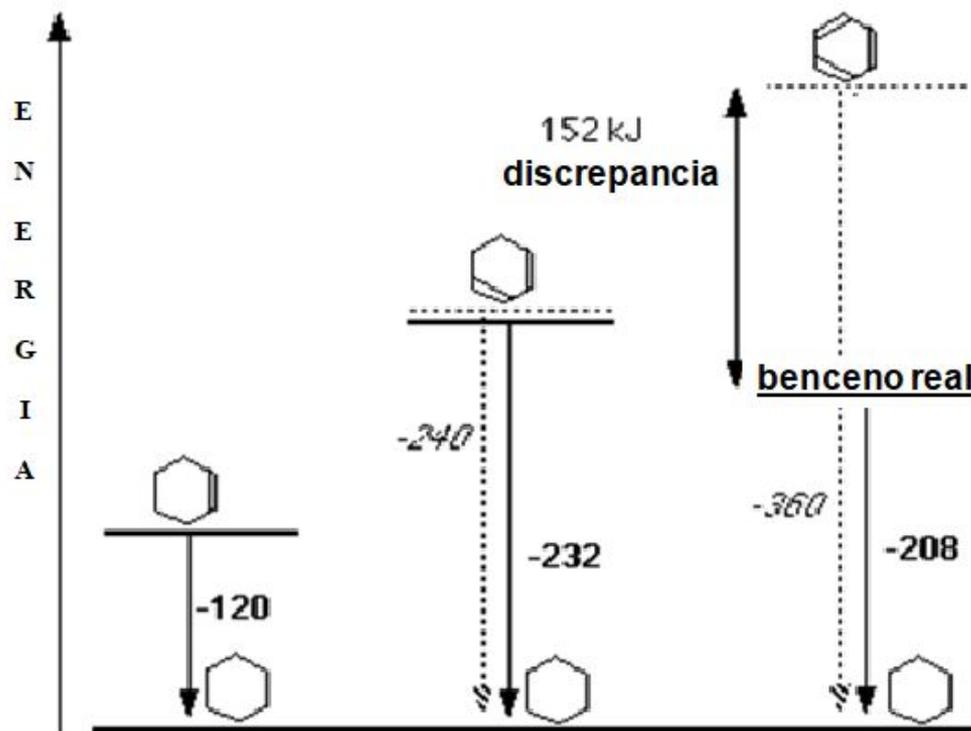
# BENCENO



Kekule

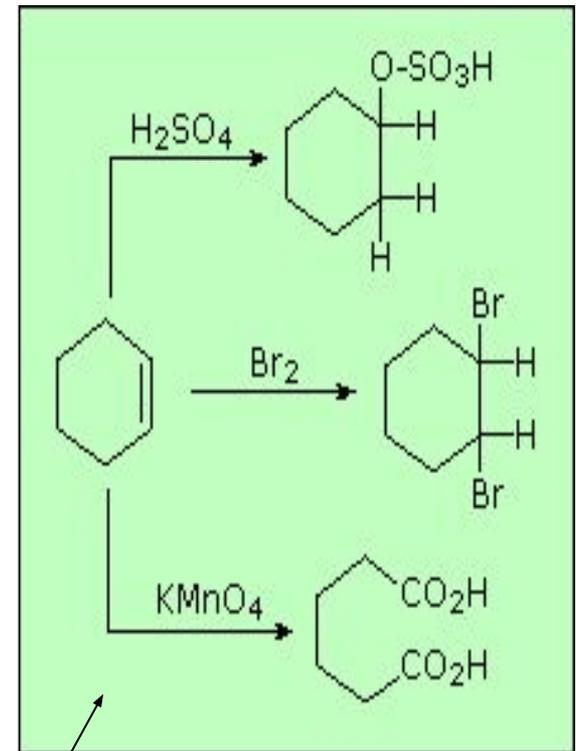
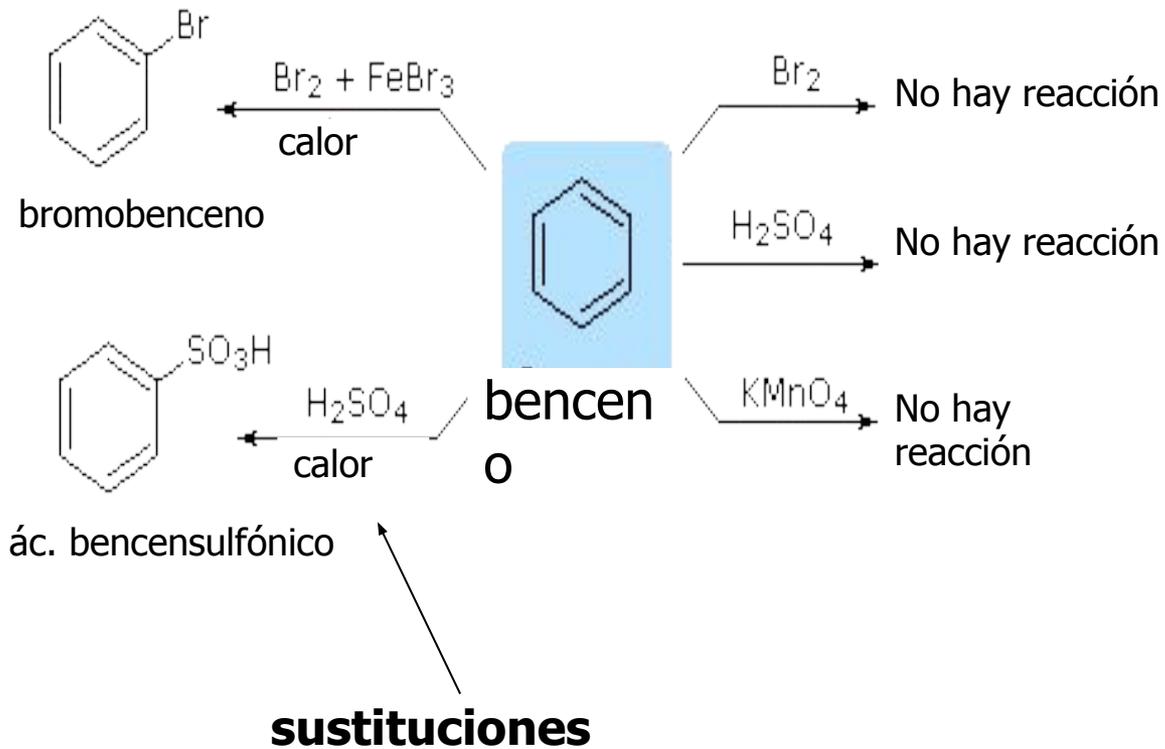


El benceno es mucho más estable que lo que cabría esperar de la estructura propuesta por Kekule



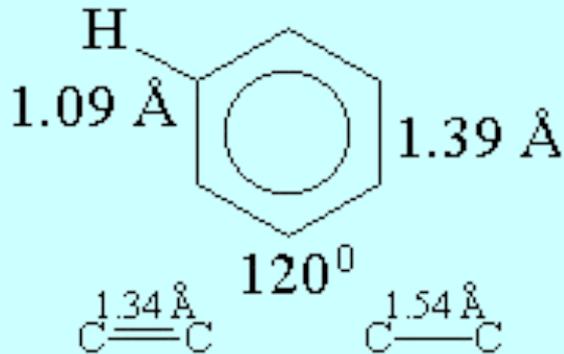
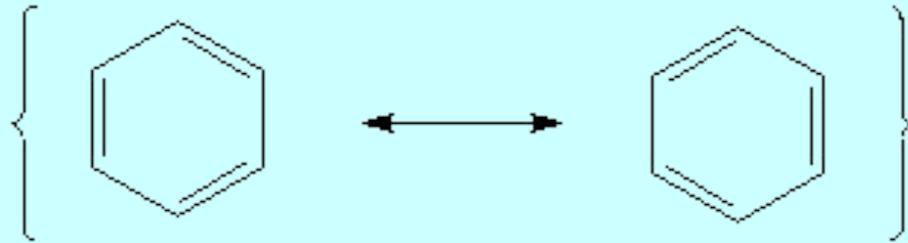
La hidrogenación del benceno libera mucha menos energía que la esperable

El benceno presenta una gran estabilidad química y propiedades diferentes a las sustancias con estructuras semejantes



**adiciones**

# Resonancia del Benceno

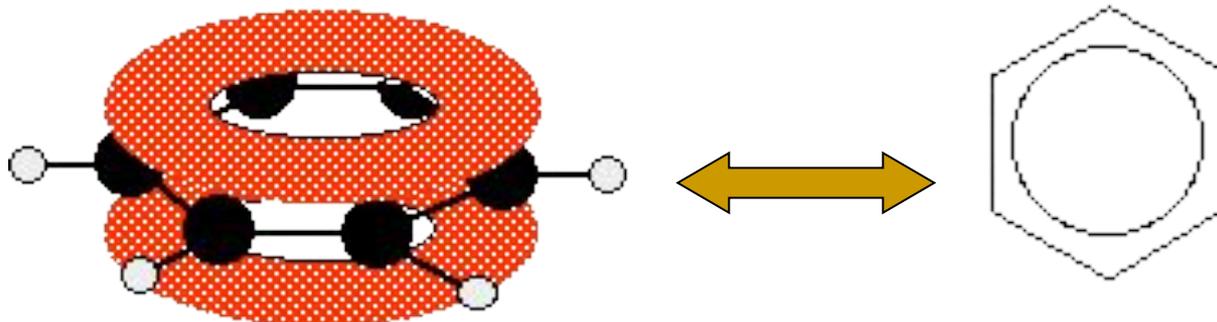
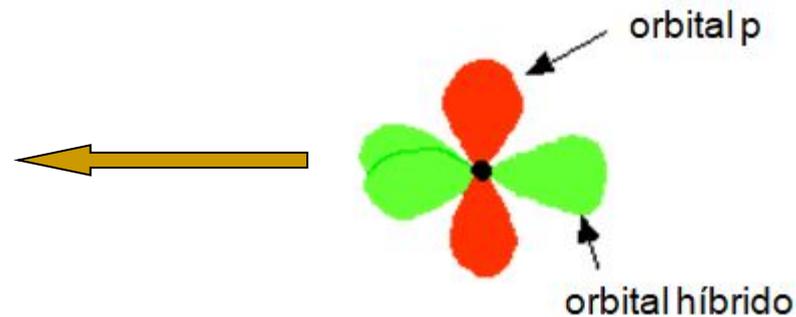
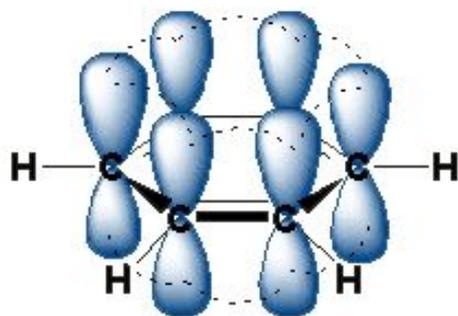
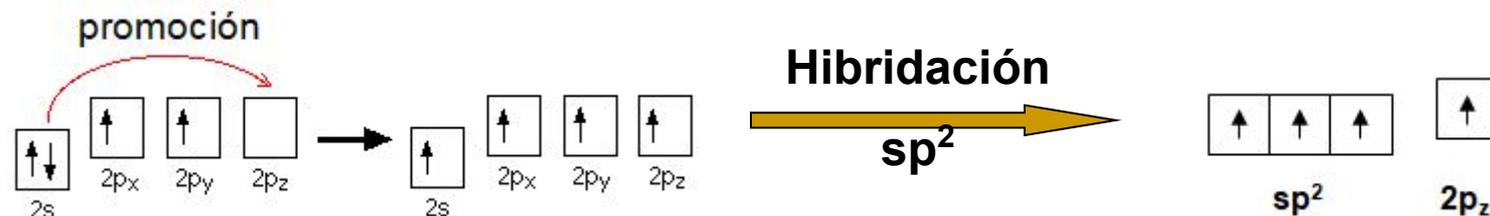


La distancia carbono-carbono en el benceno es intermedia entre la de un enlace simple y uno doble. Esto también es explicado cualitativamente por las formas resonantes.

La estructura del benceno se explica como un híbrido de resonancia entre dos estructuras equivalentes

La igual contribución de las dos formas resonantes al híbrido explica por qué los enlaces C-C del benceno tienen la misma longitud.

# Benceno y Teoría del enlace-valencia

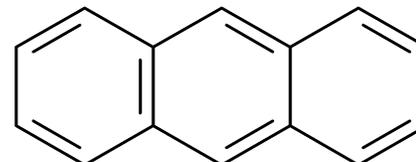
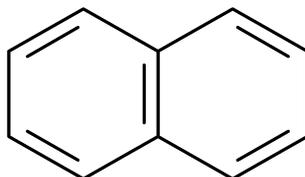
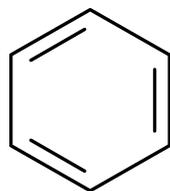


**Estabilidad debida a la deslocalización de los electrones del anillo (aromaticidad)**

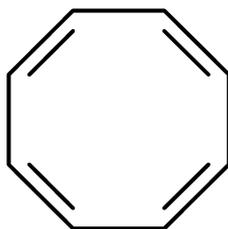
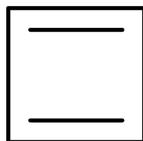
# Regla de Hückel

En 1931, E. Hückel, mediante cálculos teóricos, estableció que los anillos **planos** que tienen  $(4n + 2)$  electrones  $\pi$  poseen una alta estabilidad termodinámica (alta energía de resonancia). Esta propiedad se denomina **aromaticidad**

Aromáticos ( 6, 10, 14 electrones  $\pi$  )



No aromáticos 4, 8 electrones  $\pi$ , etc.



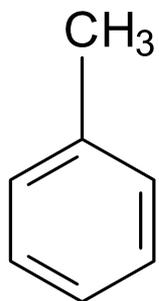
## Regla de Hückel

Un sistema conjugado cerrado (cíclico) es aromático si:

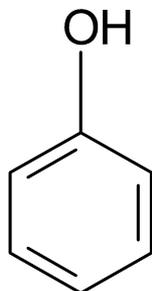
- 1) es plano
- 2) contiene  $4n + 2$  electrones  $\pi$

# Nomenclatura de compuestos derivados del benceno

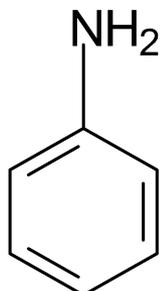
## a) Nombres triviales



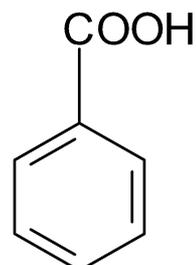
Tolueno



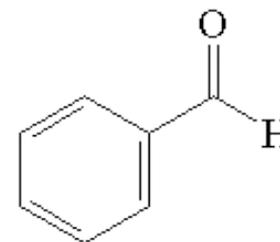
Fenol



Anilina



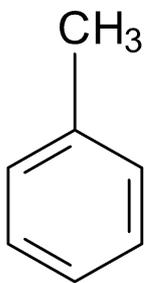
Ácido benzoico



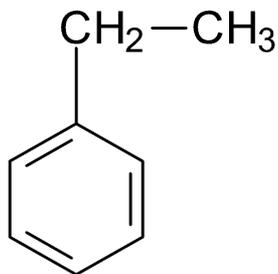
Benzaldehído

## b) Sistemática

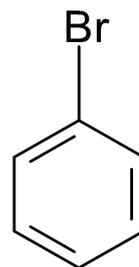
Se nombra el sustituyente presente y se termina con la palabra **benceno**



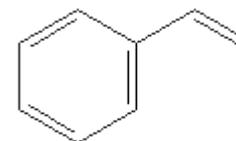
metilbenceno  
(tolueno)



etilbenceno

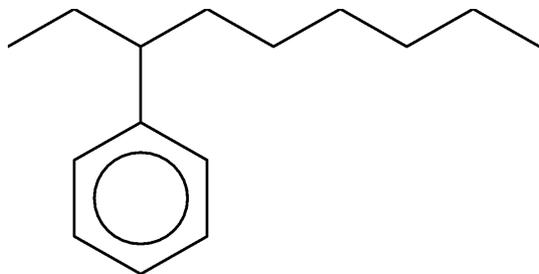


bromobenceno

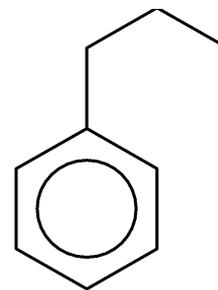


Etenilbenceno  
Vinilbenceno  
(estireno)

**c) Como sustituyente** (si el largo de la cadena es mayor de 6 átomos de carbono)

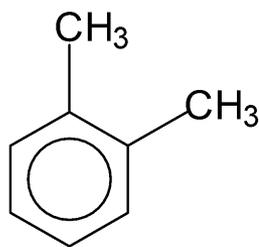


3-fenilnonano

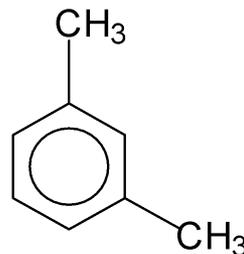


(n)-propilbenceno

**d) Nomenclatura orto (o), meta (m) y para (p)** (sólo para derivados bencénicos disustituídos)



o-dimetilbenceno  
1,2-dimetilbenceno  
o-xileno

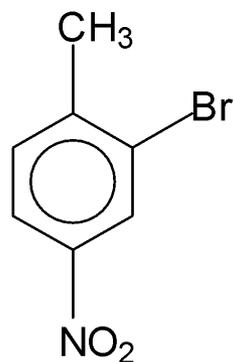


m-dimetilbenceno  
1,3-dimetilbenceno  
m-xileno

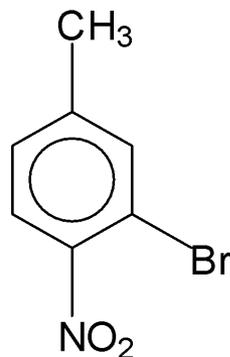


p-dimetilbenceno  
1,4-dimetilbenceno  
p-xileno

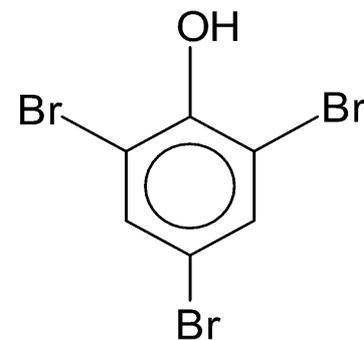
**e) Más de dos sustituyentes.** Se nombran por orden alfabético dándole la menor numeración a los sustituyentes presentes, o en base a un compuesto aromático de nombre trivial



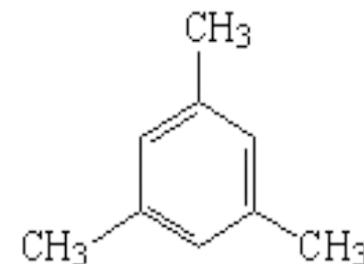
2-bromo-1-metil-4-nitrobenceno  
ó 2-bromo-4-nitrotolueno



2-bromo-4-metil-1-nitrobenceno  
ó 3-bromo-4-nitrotolueno



2,4,6-tribromofenol



1,3,5- trimetilbenceno  
(mesitileno)

# Propiedades físicas del Benceno

- Líquido incoloro
- Volátil
- Soluble en solventes orgánicos
- Inflamable
- Olor dulzón (aromático)
- Densidad: 0.8794
- Densidad de vapores: 2.70
- Punto de ebullición: 80 °C
- Es retenido por el carbón activo
- Temperatura de autoinflamación: 580 °C
- Forma mezclas explosivas con el aire entre los límites de 1,4 y 8 por 100 en volúmen.

---

# Propiedades físicas

La correlación entre las propiedades físicas y la estructura depende de las interacciones o fuerzas intermoleculares.

## FUERZAS DE INTERACCIÓN INTERMOLECULAR

- Los hidrocarburos aromáticos están formados principalmente por átomos de C e H.
  - Las diferencias de electronegatividad de carbono e hidrogeno es tan pequeña que no produce polaridad en estas moléculas.
  - La asociación intermolecular que los caracteriza son las **FUERZAS DE DISPERSIÓN DE LONDON**
  - Las propiedades físicas dependen tan sólo del peso molecular
-

## SOLUBILIDAD

Son compuestos altamente hidrofóbicos y apolares, por lo tanto, insolubles en agua y solubles en solventes apolares como los hidrocarburos alifáticos o aromáticos

## PUNTO DE EBULLICIÓN

- Aumentan a medida que aumenta el peso molecular; usualmente se produce un aumento entre 20 y 30 °C por cada átomo de carbono que se agrega a la cadena.

---

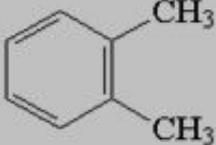
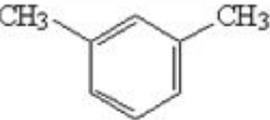
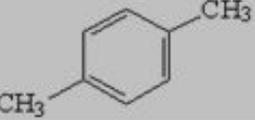
	<b>Punto de ebullición (°C)</b>
<b>Benceno C<sub>6</sub>H<sub>6</sub></b>	80
<b>Tolueno C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CH<sub>3</sub></b>	111
<b>p-xileno C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub></b>	138

---

## PUNTO DE FUSIÓN

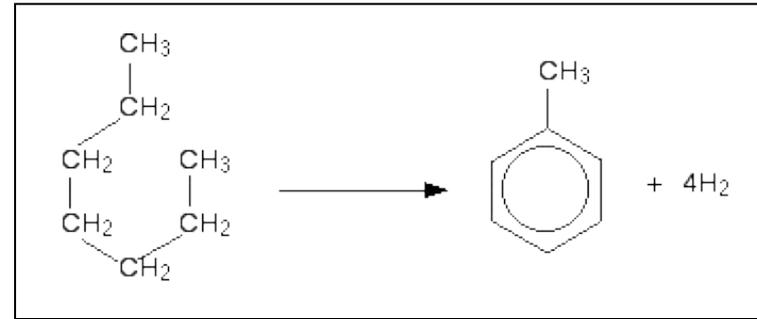
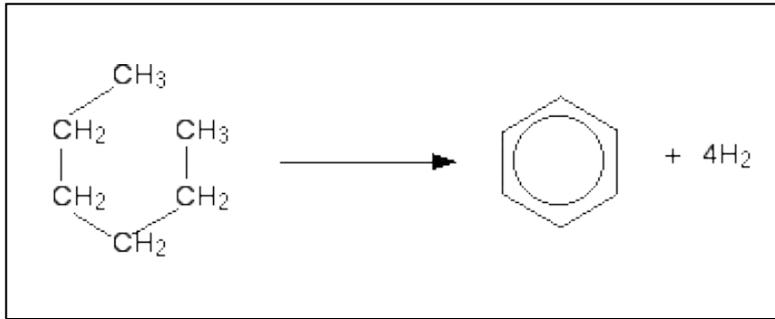
Los puntos de fusión **aumentan a medida que aumenta el peso molecular**.

Los puntos de fusión también dependen de la simetría estructural de las moléculas. **Las moléculas mas simétricas tienen mayor punto de fusión que las asimétricas.**

		Punto de fusión (°C)
<b>Benceno</b>	$C_6H_6$	5,5
<b>Tolueno</b>	$C_6H_5CH_3$	-95
<b>o-xileno</b>		-25
<b>m-xileno</b>		-48
<b>p-xileno</b>		-13,2

## **OBTENCIÓN INDUSTRIAL**

**Reforming catalítico:** Cadenas de hidrocarburos de  $C_6$  a  $C_8$  procedentes de gasolina o nafta son convertidas en compuestos que contienen anillos bencénicos. Como producto secundario se obtiene hidrógeno.

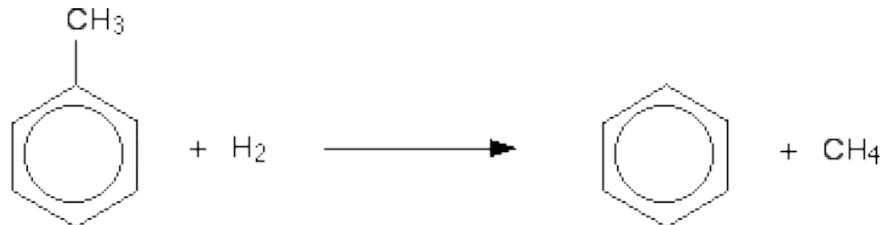


Catalizador: óxido de aluminio + platino (platforming)

Temperatura 500 °C ; Presión 20 atm

**Dealquilación:** Catalizador: óxido de aluminio

Temperatura 550-650 °C ; Presión 30-50 atm

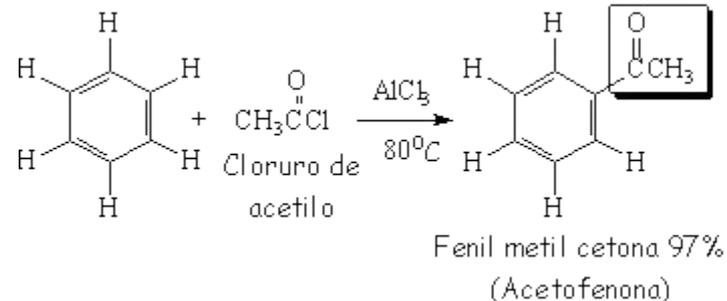
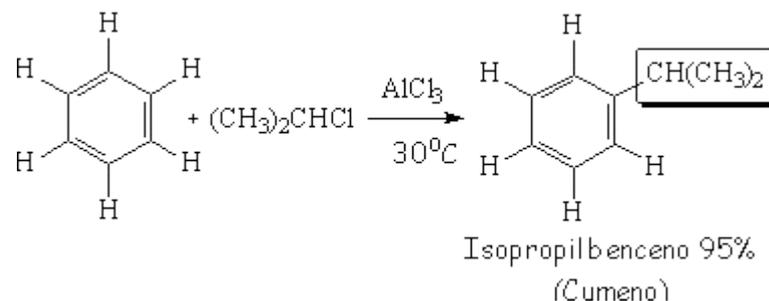
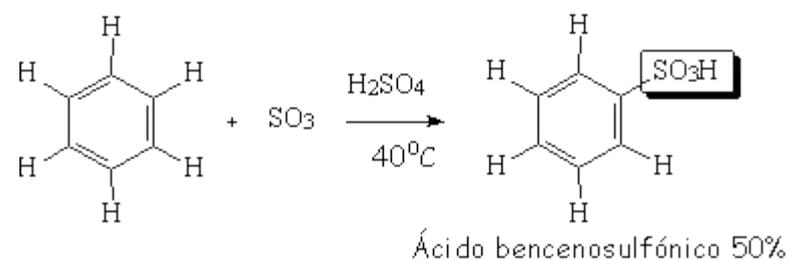
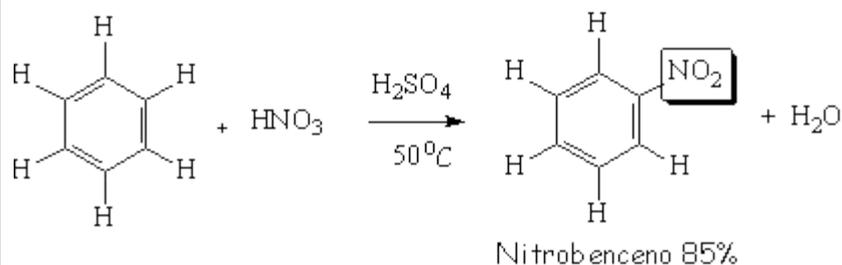
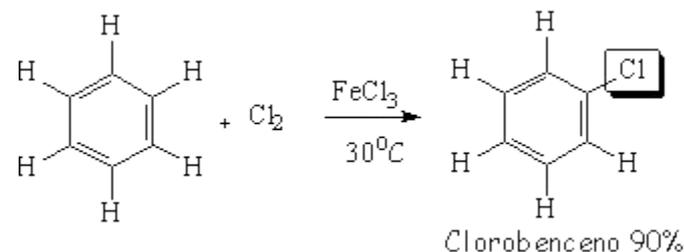


# Teoría de la sustitución electrofílica aromática

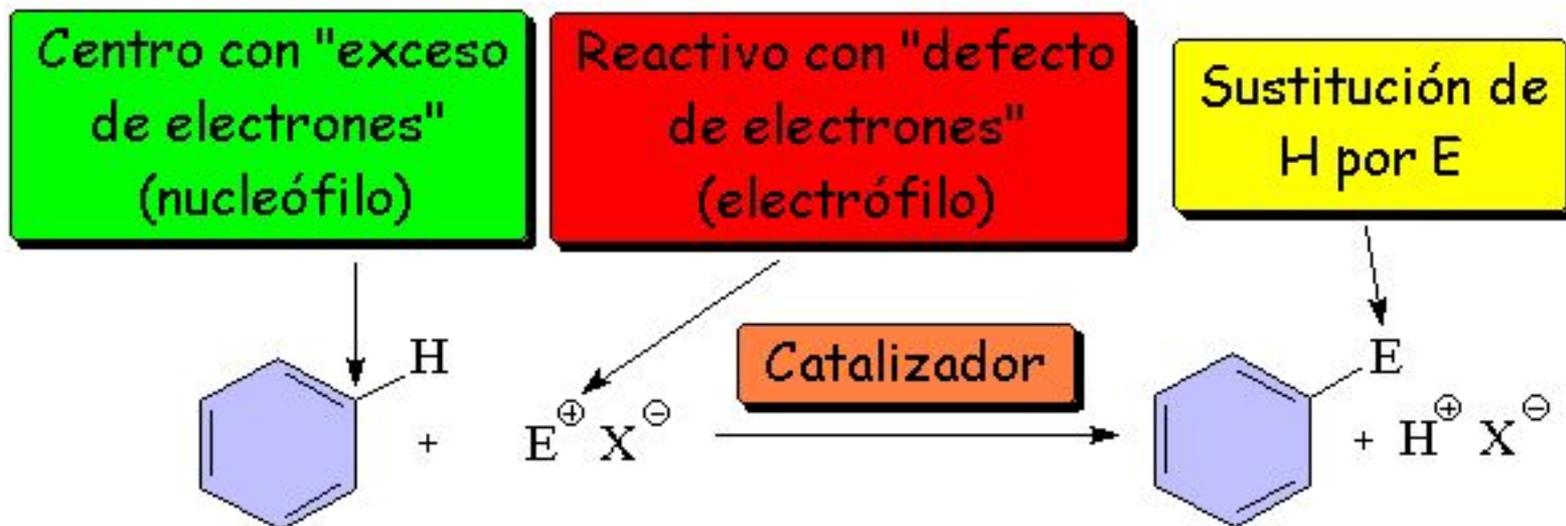
- El benceno, a pesar de su alta insaturación, no da reacciones de adición sino de sustitución
  - En este tipo de reacciones se produce la sustitución de una especie unida al anillo aromático por otra especie electrofílica similar
  - El electrófilo que se desplaza comúnmente es **H<sup>+</sup>**
  - Las especies electrofílicas más comunes son **Br<sup>+</sup>**;  
**SO<sub>3</sub>** ; **NO<sub>2</sub><sup>+</sup>** y **R<sup>+</sup>**
-

# SUSTITUCIÓN AROMÁTICA ELECTROFÍLICA

A pesar de su estabilidad excepcional, **el benceno y los compuestos aromáticos están lejos de ser inertes**



# Sustitución Electrónica Aromática (SEA)

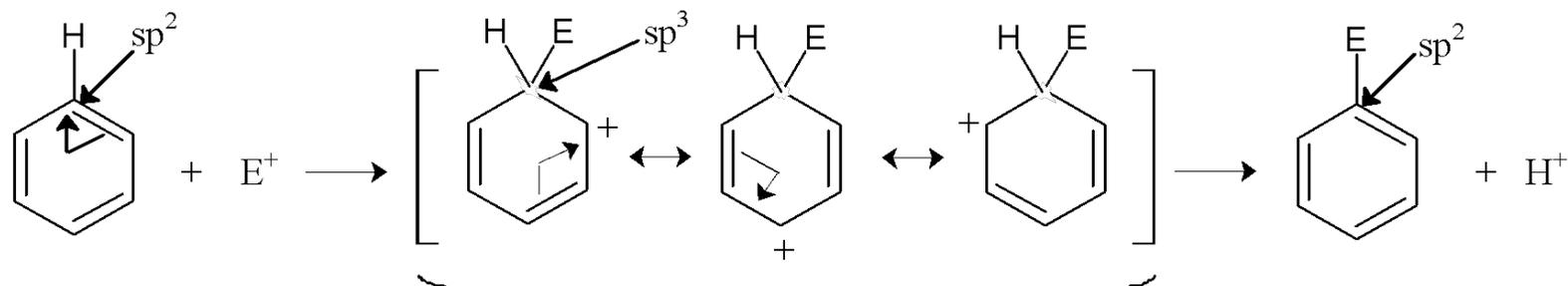
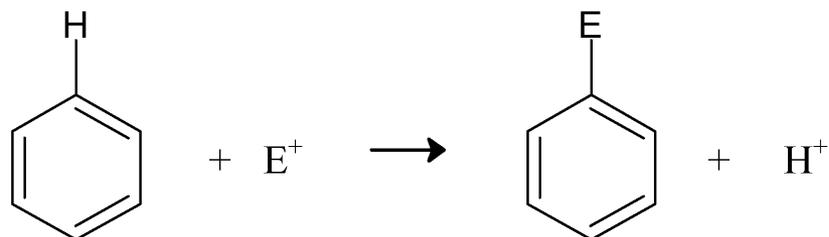


Un reactivo con defecto electrónico ataca a la nube  $\pi$  del benceno, rica en electrones, para dar un derivado de benceno (la aromaticidad no se pierde) en el que se ha sustituido un hidrógeno por una grupo funcional.

# Mecanismo general

La reacción consiste en la *sustitución de un hidrógeno* unido al anillo aromático, el cual sale como *protón* ( $H^+$ ), por otro *electrófilo* ( $E^+$ ).

Reacción general:



*benceno*  
(sustrato)  
(1)

*Ión bencenonio o complejo*  
(intermedio)  
(2)

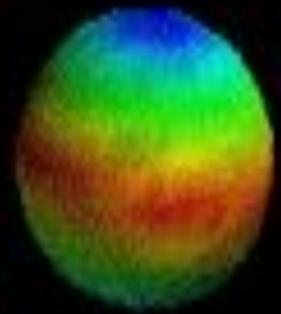
*benceno monosustituido*  
(producto)  
(3)

**Primera etapa:** El electrófilo ( $E^+$ ) se une al anillo aromático por enlace  $\sigma$ , usando dos electrones  $\pi$ , formándose el intermedio.

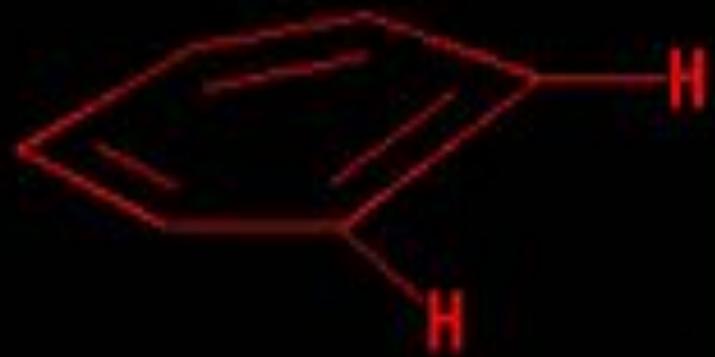
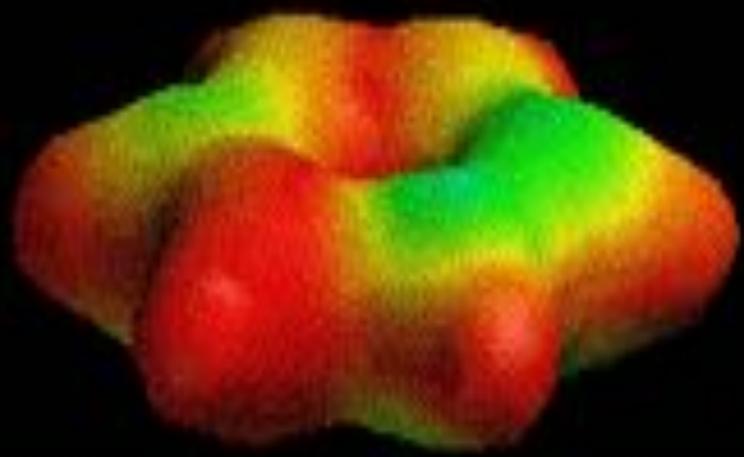
**Segunda etapa:** El intermedio pierde el hidrógeno, como protón. Los dos electrones que deja el  $H^+$  vuelven al anillo, regenerándose el sexteto de electrones  $\pi$ .



El color azul  
indica carga +



$E^+$



# SUSTITUCIÓN AROMÁTICA ELECTROFÍLICA DE LOS DERIVADOS DEL BENCENO

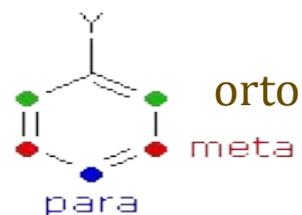
## ASPECTOS A TENER EN CUENTA EN LA SUSTITUCIÓN DE DERIVADOS DEL BENCENO

### REACTIVIDAD

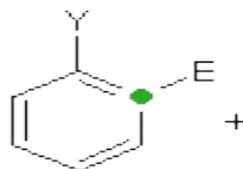
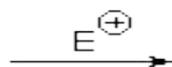
¿Cómo es de rápida la reacción comparada con el benceno?

### ORIENTACIÓN

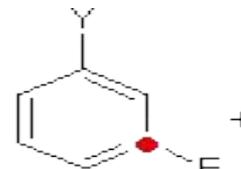
¿En qué posición entra el segundo grupo sustituyente?



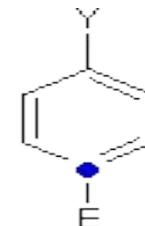
Un benceno monosustituido



Isómero orto



Isómero meta



Isómero para

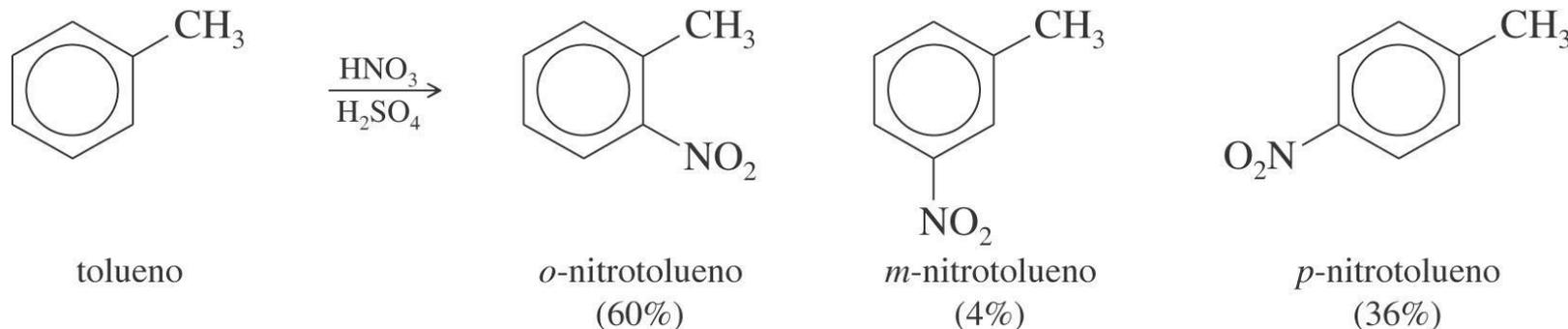
El resultado dependerá de la capacidad del grupo unido al benceno para estabilizar la carga positiva que se forma en el ión bencenonio

Efecto inductivo

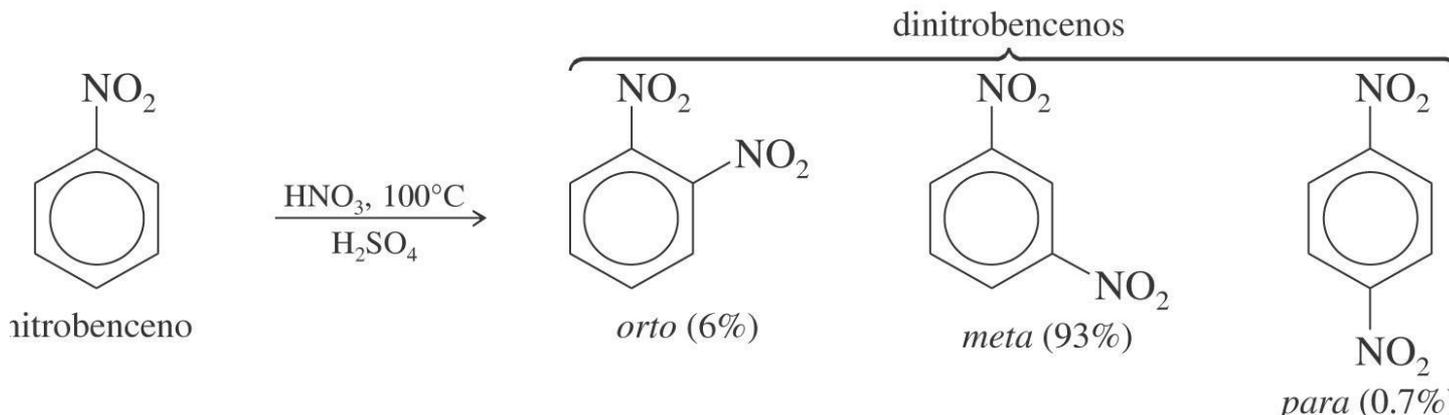
Efecto mesómero o resonante

## Nitración del tolueno

El tolueno reacciona unas 25 veces más deprisa que el benceno en las mismas condiciones. Se dice que el tolueno está activado para la sustitución electrofílica aromática y que el grupo metilo es un grupo activante. Los productos mayoritarios son los isómeros *orto* y *para*.



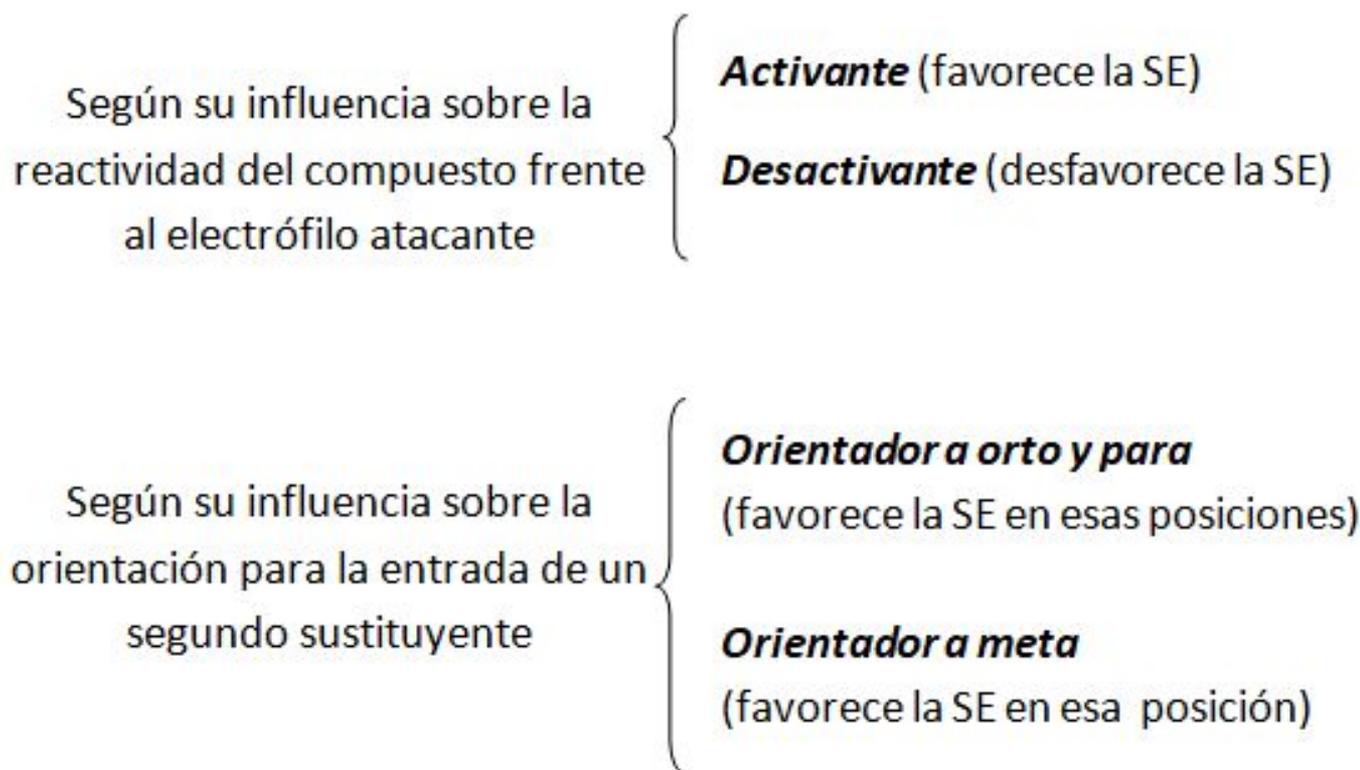
## Nitración del nitrobenceno

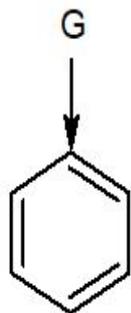


El nitrobenceno es unas 100.000 veces menos reactivo que el benceno respecto a la sustitución electrofílica aromática. La nitración del nitrobenceno requiere ácidos nítrico y sulfúrico concentrados, y una temperatura superior a 100°C; la nitración es lenta, dando lugar al isómero *meta* como producto mayoritario.

# Efectos de los grupos sustituyentes

Al sustituyente presente se lo clasifica de acuerdo a cómo influye sobre la reactividad y la orientación:

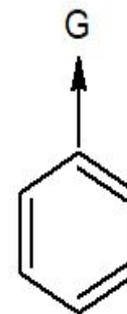




**G cede densidad electrónica al anillo.**

Los electrones  $\pi$  del anillo están más disponibles que en benceno sin sustituyente.

**Mayor reactividad que benceno frente a un reactivo electrofílico ( $E^+$ )**



**G quita densidad electrónica al anillo.**

Los electrones  $\pi$  del anillo están menos disponibles que en benceno sin sustituyente.

**Menor reactividad que benceno frente a un reactivo electrofílico ( $E^+$ )**

Según los resultados experimentales se ha concluido que:

- Los sustituyentes Activantes son orientadores a orto- y para-*
- Los sustituyentes Desactivantes son orientadores a meta-*
- Los Halógenos son desactivantes y orientadores a orto- y para (excepción de las dos reglas anteriores).*

-Un grupo desactivante, desactiva todas las posiciones, pero desactiva más las posiciones orto y para.

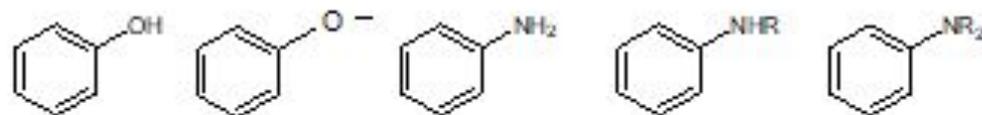
-Un grupo activante activa todas las posiciones, pero activa más las posiciones orto y para.

Grupos que atraen electrones	Por efecto inductivo	$\begin{array}{ccccccc} & & \text{F} & & \text{O} & & \\ & & \uparrow & & \uparrow & & \\ \text{H}_4\text{N}^+ & \text{F} & \leftarrow \text{C} \rightarrow \text{F} & & \text{O} \leftarrow \text{S} \rightarrow \text{OH} & \text{Cl} & \text{F} \\ \uparrow & & \uparrow & & \uparrow & \uparrow & \uparrow \end{array}$
	Por efecto mesómero	$\begin{array}{cccc} \text{O} \leftarrow \text{N} = \text{O} & \text{HO} - \text{C} = \text{O} & \text{H} - \text{C} = \text{O} & - \text{C} = \text{O} \\ \downarrow \searrow & \downarrow \searrow & \downarrow \searrow & \downarrow \searrow \end{array}$ <p>Grupos del tipo <math>-\text{X} = \text{Y}</math>, donde Y es más electronegativo que carbono</p>
Grupos que ceden electrones	Por efecto inductivo	$\text{R} \quad (\text{Grupos alquilo})$ $\downarrow$
	Por efecto mesómero	$\begin{array}{cccc} \text{:NH}_2 & \text{:OH} & \text{:F} & \text{:Cl} \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \end{array}$ <p>Grupos que poseen dos electrones sin compartir en el átomo que va unido al anillo</p>

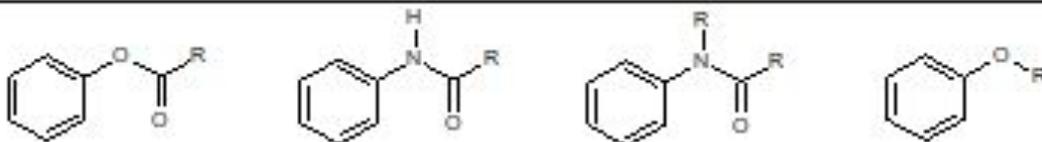
LISTADO DE ACTIVADORES Y DESACTIVADORES POR CATEGORÍA

**Activadores**

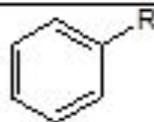
**Fuertes**



**Moderados**

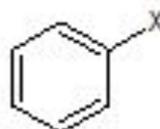


**Débiles**

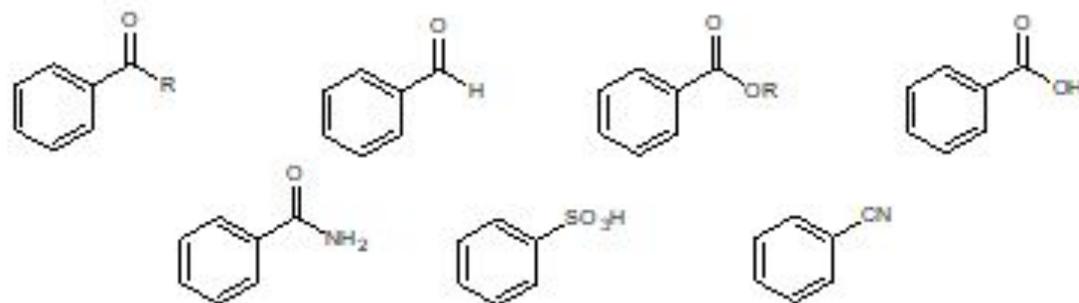


**Desactivadores**

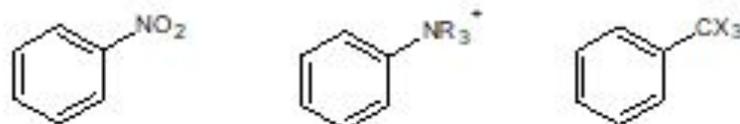
**Débiles**



**Moderados**



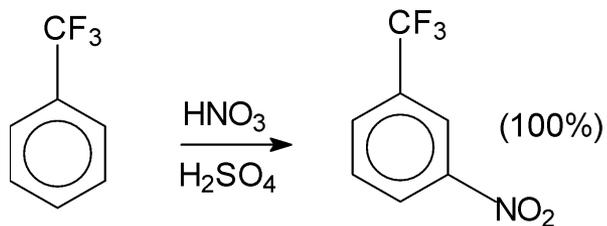
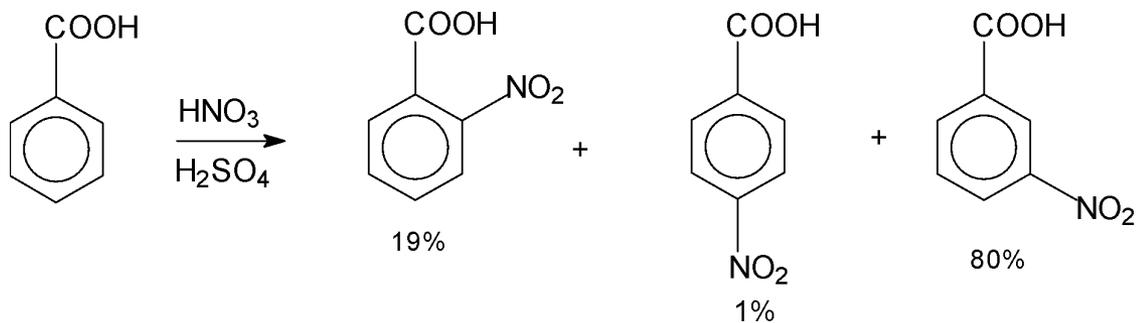
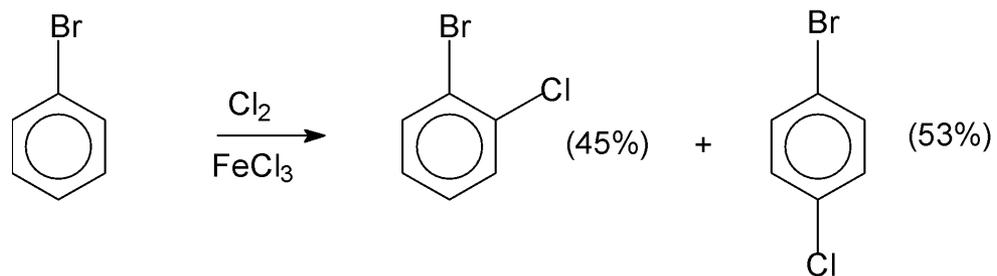
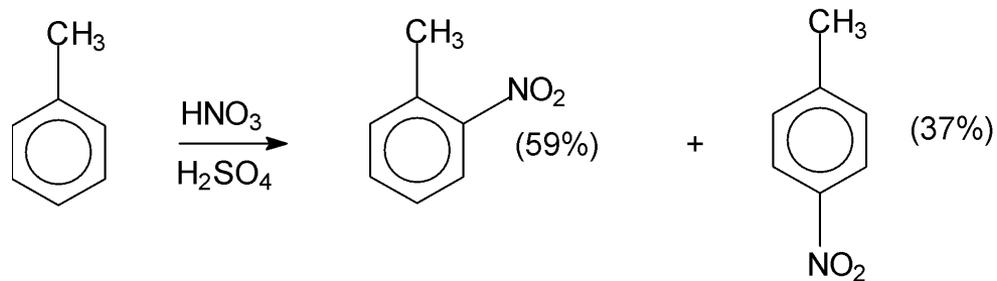
**Fuertes**



**Directores  
orto-para**

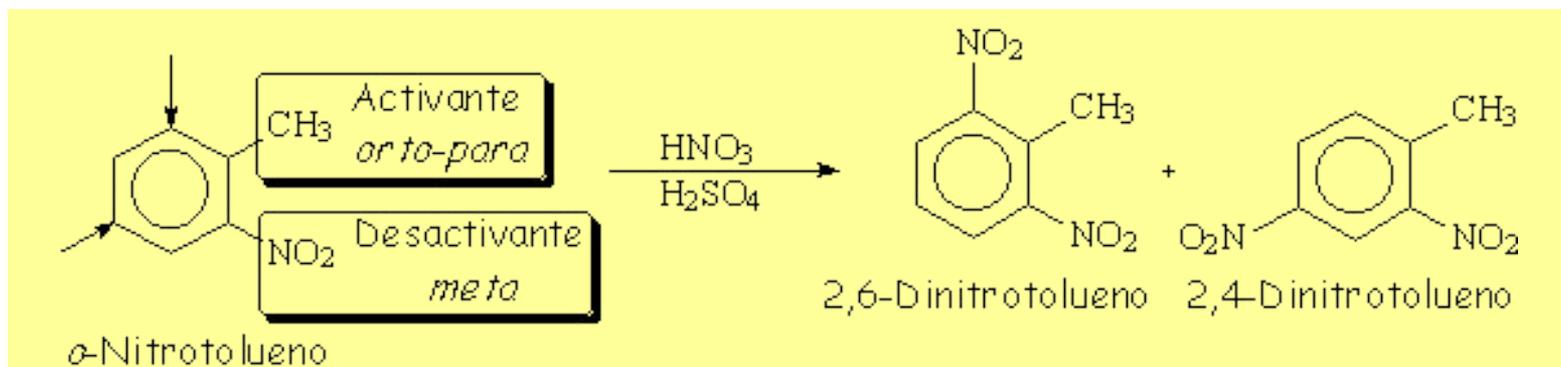
**Directores  
meta**

# Ejemplos

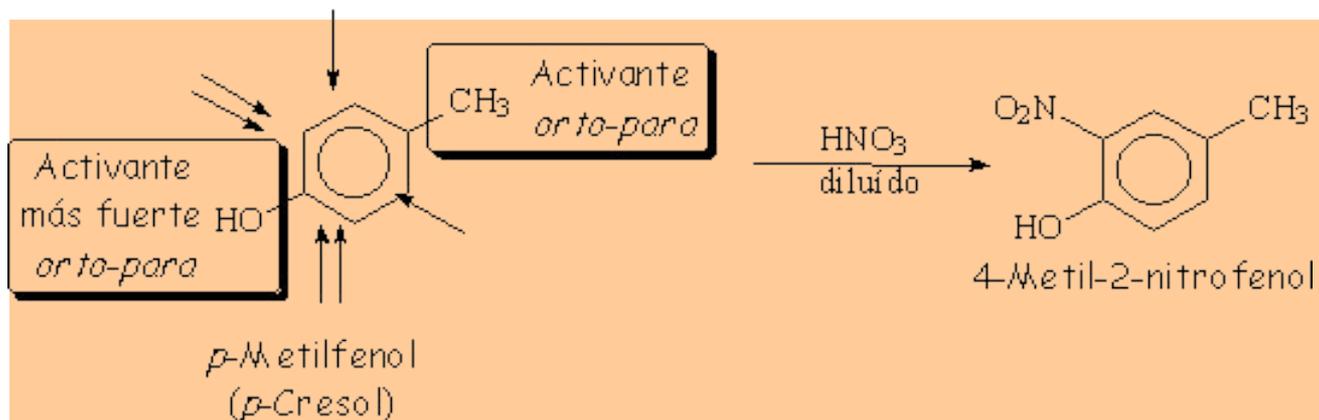


## SUSTITUCIÓN AROMÁTICA ELECTROFÍLICA DE LOS POLIDERIVADOS DEL BENCENO

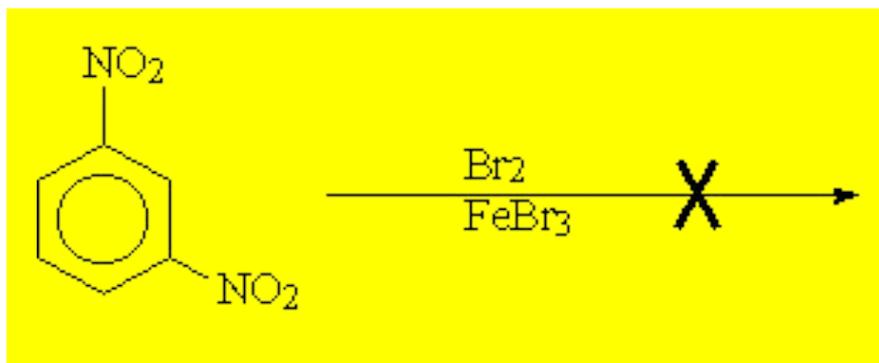
Si dos sustituyentes orientan a la misma posición, esa será la que se sustituya:



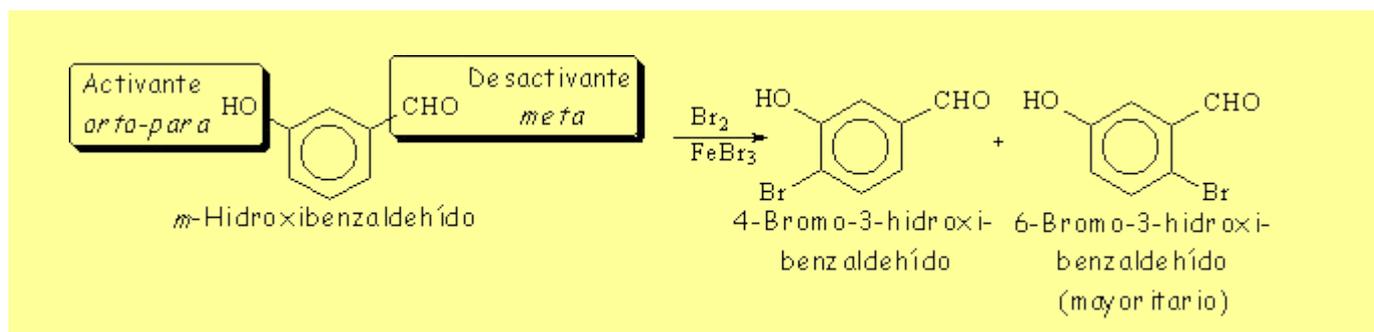
Si dos sustituyentes tienen en conflicto sus efectos directores, el grupo más activante será el que gane la partida:



Si existen dos sustituyentes desactivantes, independientemente de su posición, la tercera sustitución puede ser muy difícil o imposible:

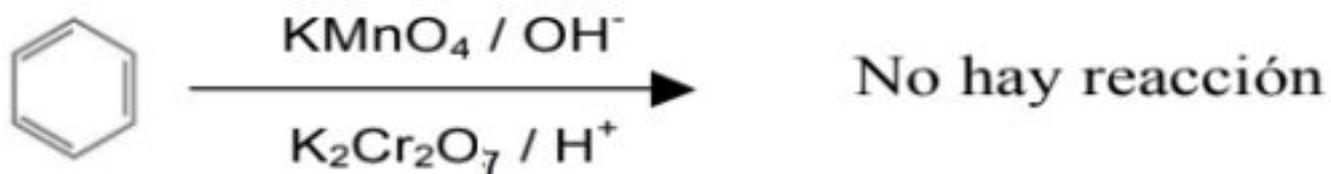


Si dos grupos están en disposición relativa meta, la tercera sustitución no tiene lugar en la posición que queda entre ellos puesto que es la más impedida estéricamente:

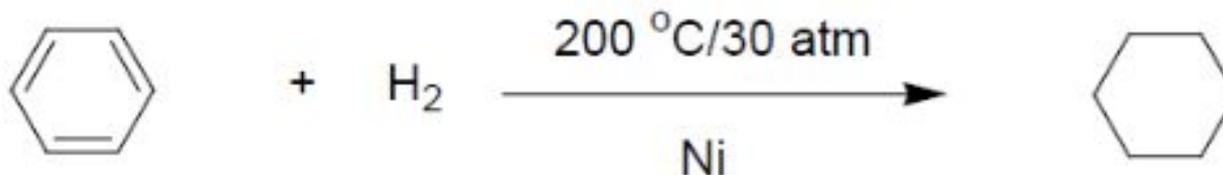


# Reacciones redox

## Reacciones de oxidación

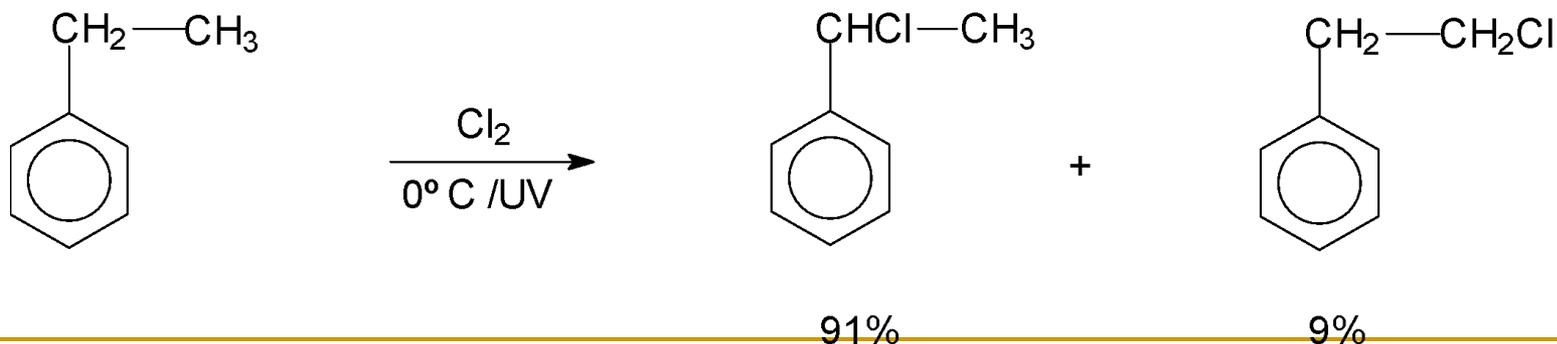
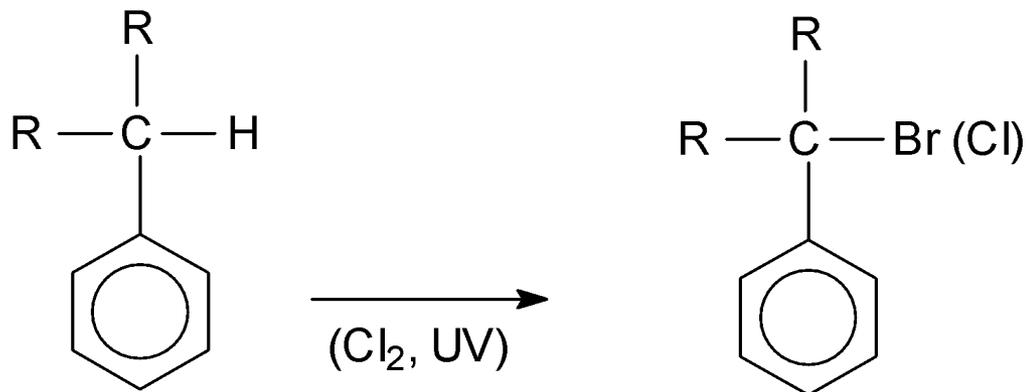


## Reacciones de reducción



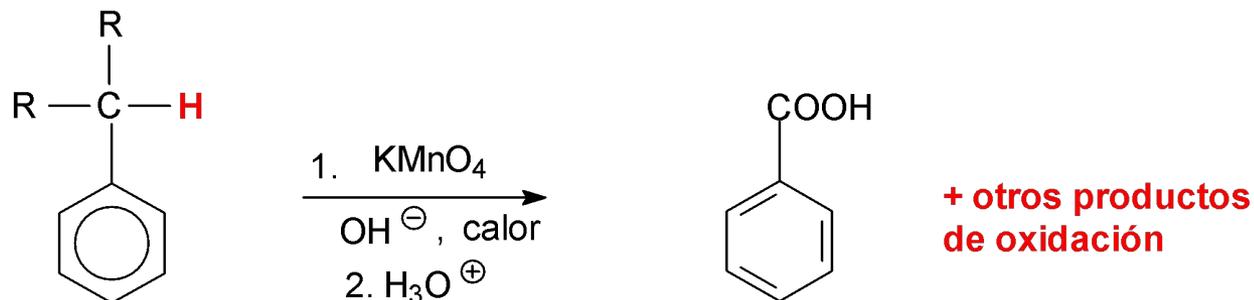
# Algunas reacciones de cadenas laterales

## Halogenación

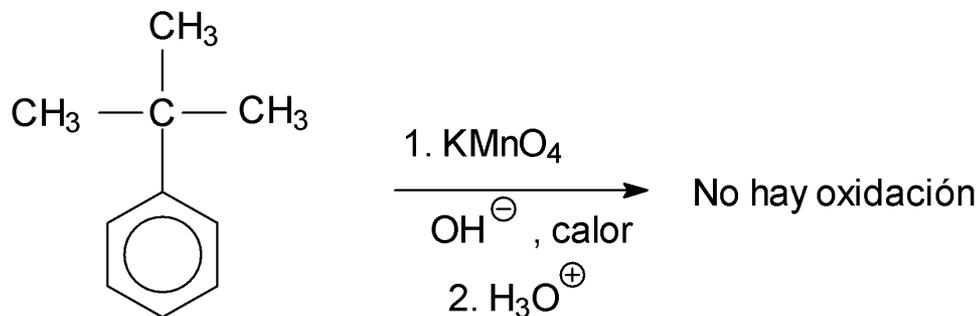
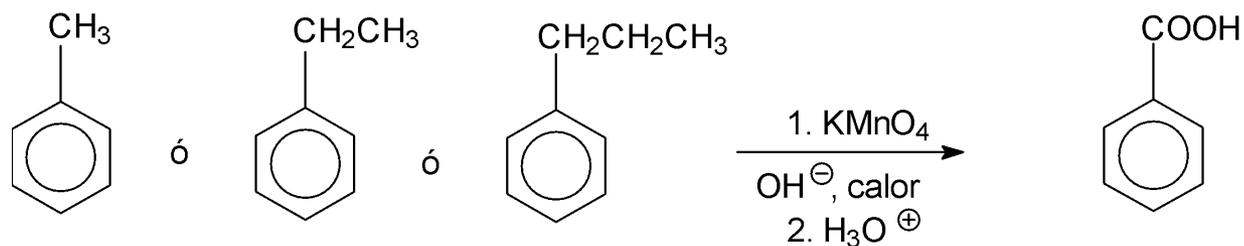


# Oxidación

En cadenas laterales con al menos 1 enlace C - H

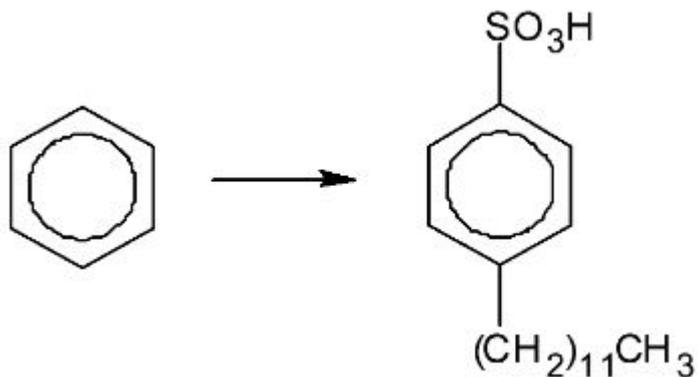


así



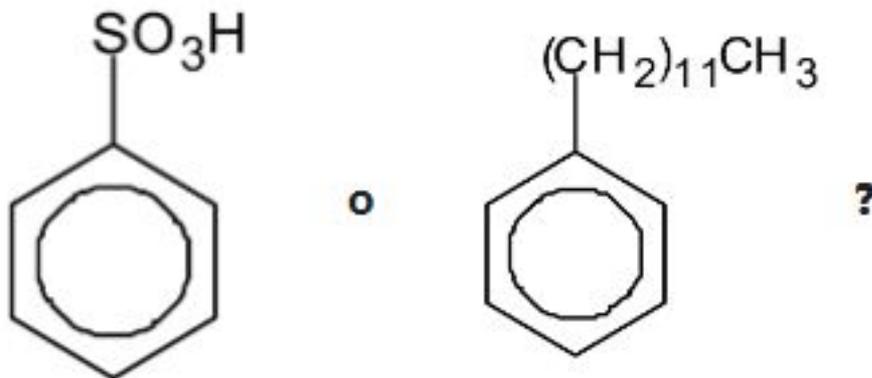
# Síntesis de compuestos aromáticos

## Síntesis de ácido p-dodecilbensulfónico a partir de benceno



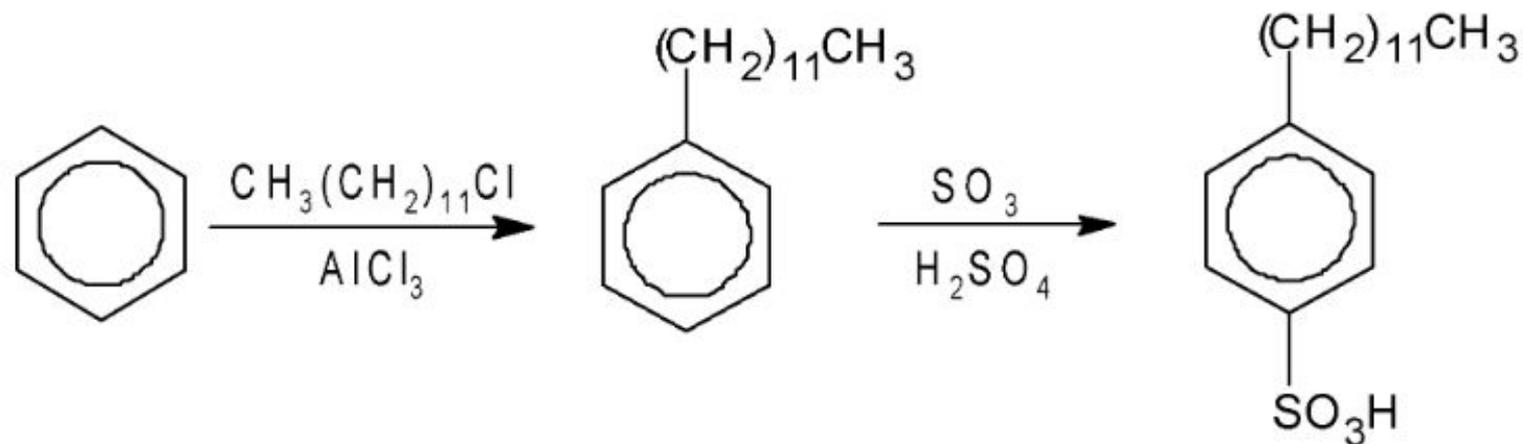
### Estrategia de síntesis

1.- ¿Se puede partir de



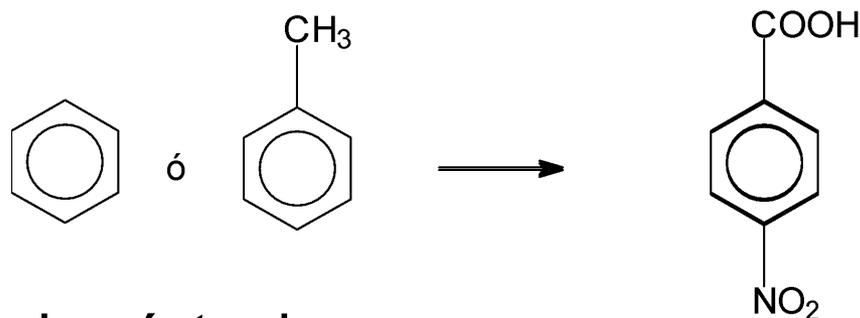
El análisis de los grupos presentes indica que, uno de ellos, es un orientador orto-para:  $(\text{CH}_2)_{11}\text{CH}_3$  y el otro, es un orientador meta:  $\text{SO}_3\text{H}$

Luego, el esquema de la síntesis es:



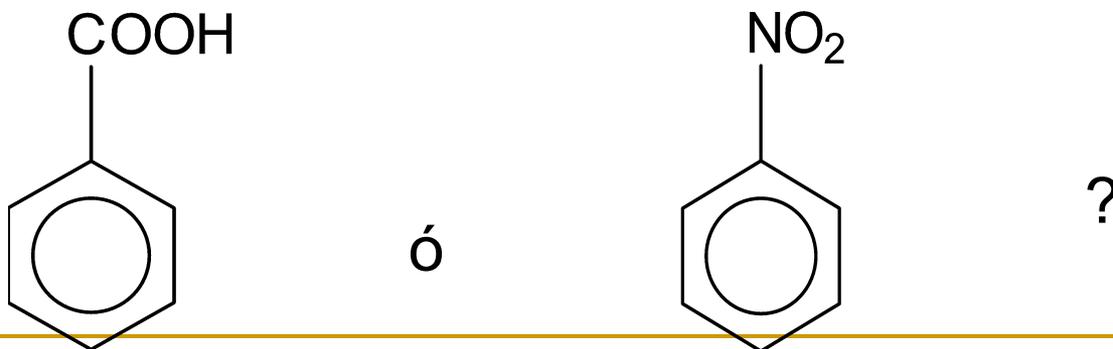
# Síntesis de compuestos aromáticos

Síntesis de **ácido p-nitrobenzoico** a partir de benceno o tolueno



## Estrategia de síntesis

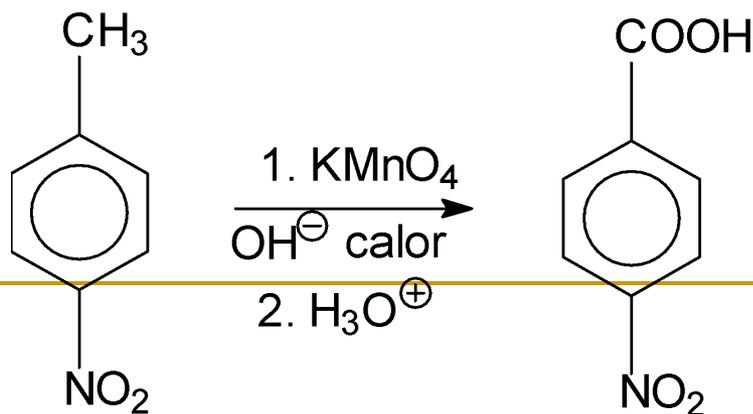
1.- ¿Se puede partir de



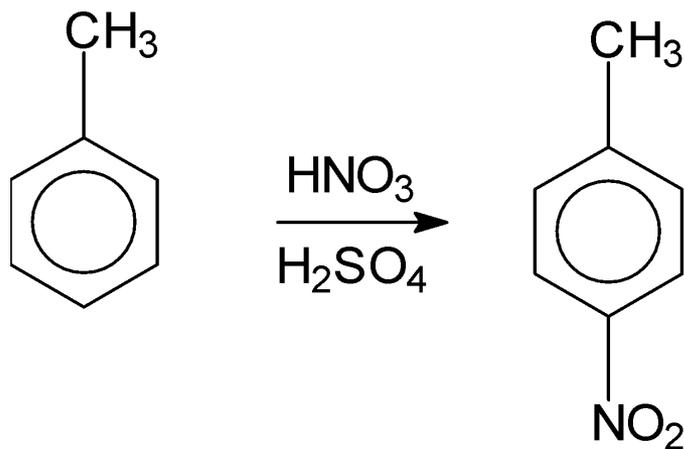
La respuesta es no, ya que en cada uno de ellos hay un sustituyente orientador a la posición **meta** (**COOH** y **NO<sub>2</sub>**)

Como en el producto ambos sustituyentes están en la posición **para**, por lo menos **uno de ellos**, inicialmente era un **orientador orto-para** que después sufrió una transformación química, transformándose en un orientador meta

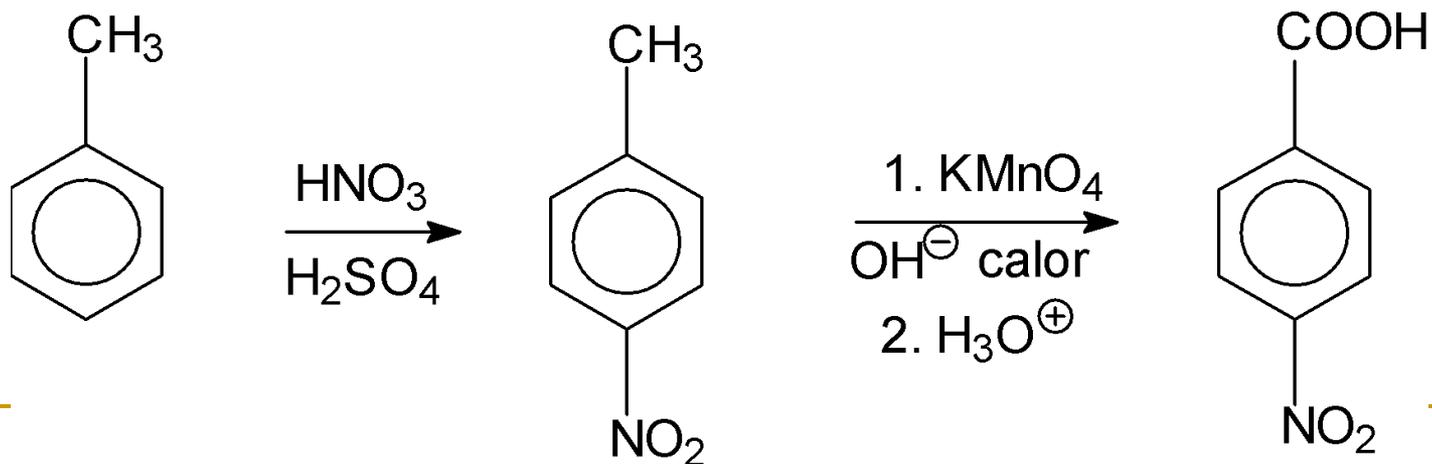
El análisis de los grupos presentes indica que, lo más probable es que el grupo carboxilo provenga de la oxidación de un grupo alquilo presente en un anillo que ya tenía incorporado el grupo nitro (inerte a la oxidación)



Luego, el reactivo inicial es el tolueno, que por nitración da p-nitrotolueno

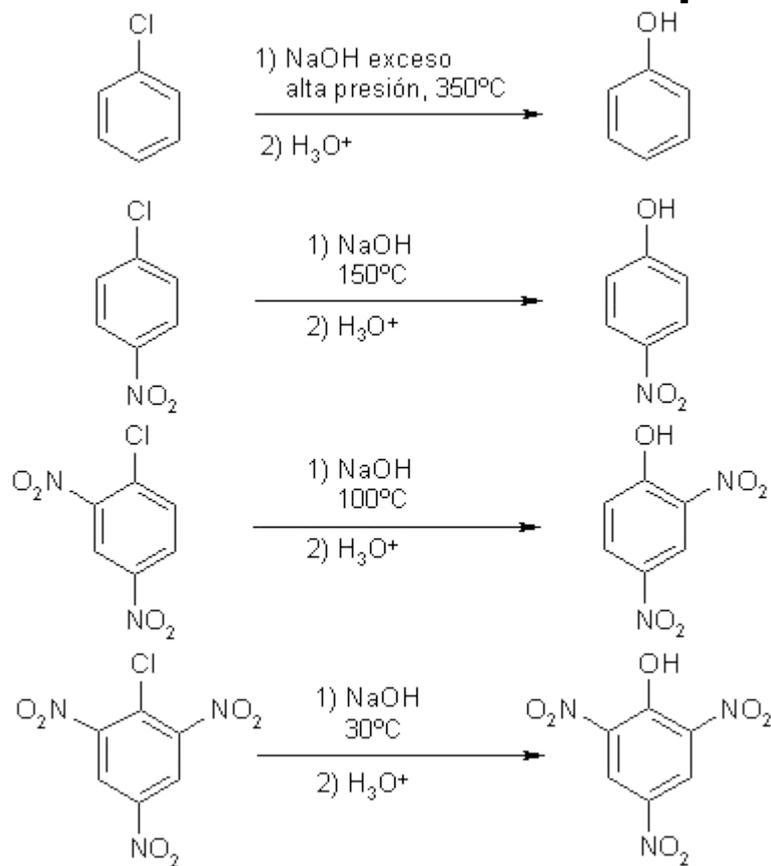


y el esquema de la síntesis es



# SUSTITUCIÓN AROMÁTICA NUCLEOFÍLICA

Si el compuesto aromático tiene uno o varios sustituyentes fuertemente atrectores de electrones, la sustitución nucleófila pueda darse.



El clorobenceno reacciona con hidróxido (nucleófilo) en condiciones extraordinariamente drásticas. Sin embargo, la sustitución nucleófila del cloro se facilita enormemente si existen grupos atrectores de electrones en el anillo. La reacción del 2,4,6-trinitroclorobenceno con hidróxido conduce al ácido pícrico (2,4,6-trinitrofenol) en condiciones muy suaves.