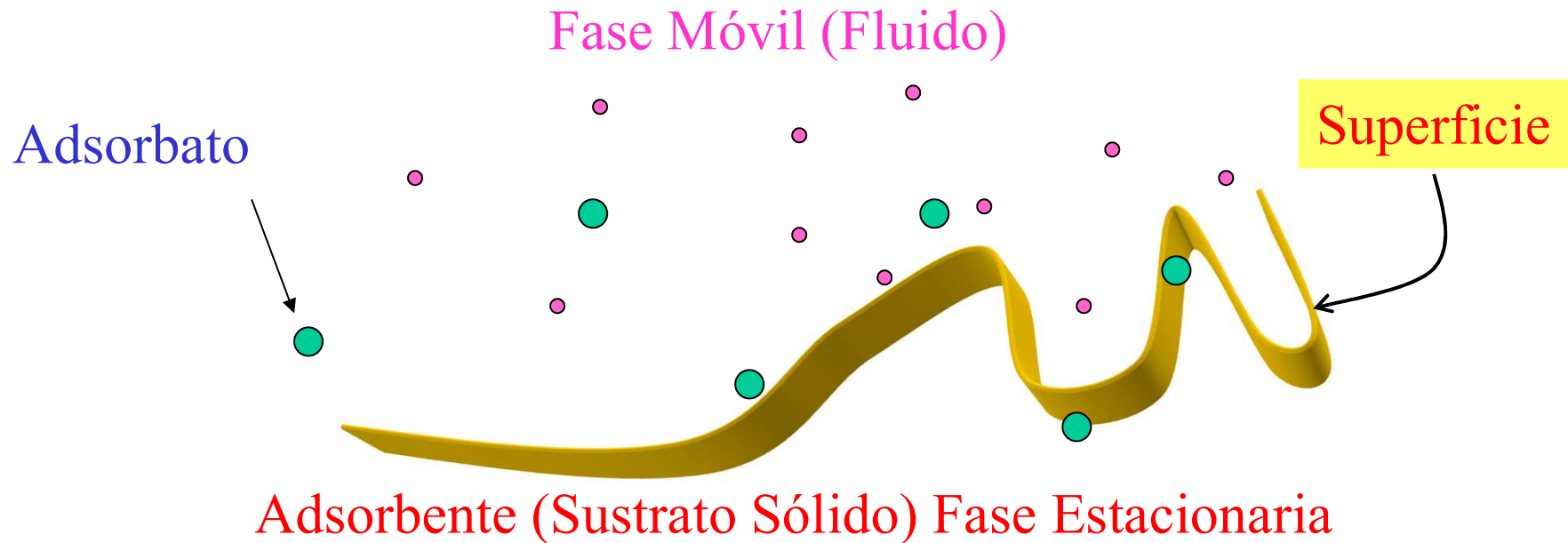


# ADSORCIÓN e INTERCAMBIO IÓNICO

Son Operaciones Unitarias de **transferencia de materia** en las que un **soluto** contenido en una **fase fluida** **se transfiere** hacia una **fase sólida**, ya sea por retención en su superficie o por la reacción con el sólido.

# ADSORCIÓN

Termino utilizado para describir la tendencia de las moléculas de una fase Fluida a Adherirse a la Superficie de un Sólido.



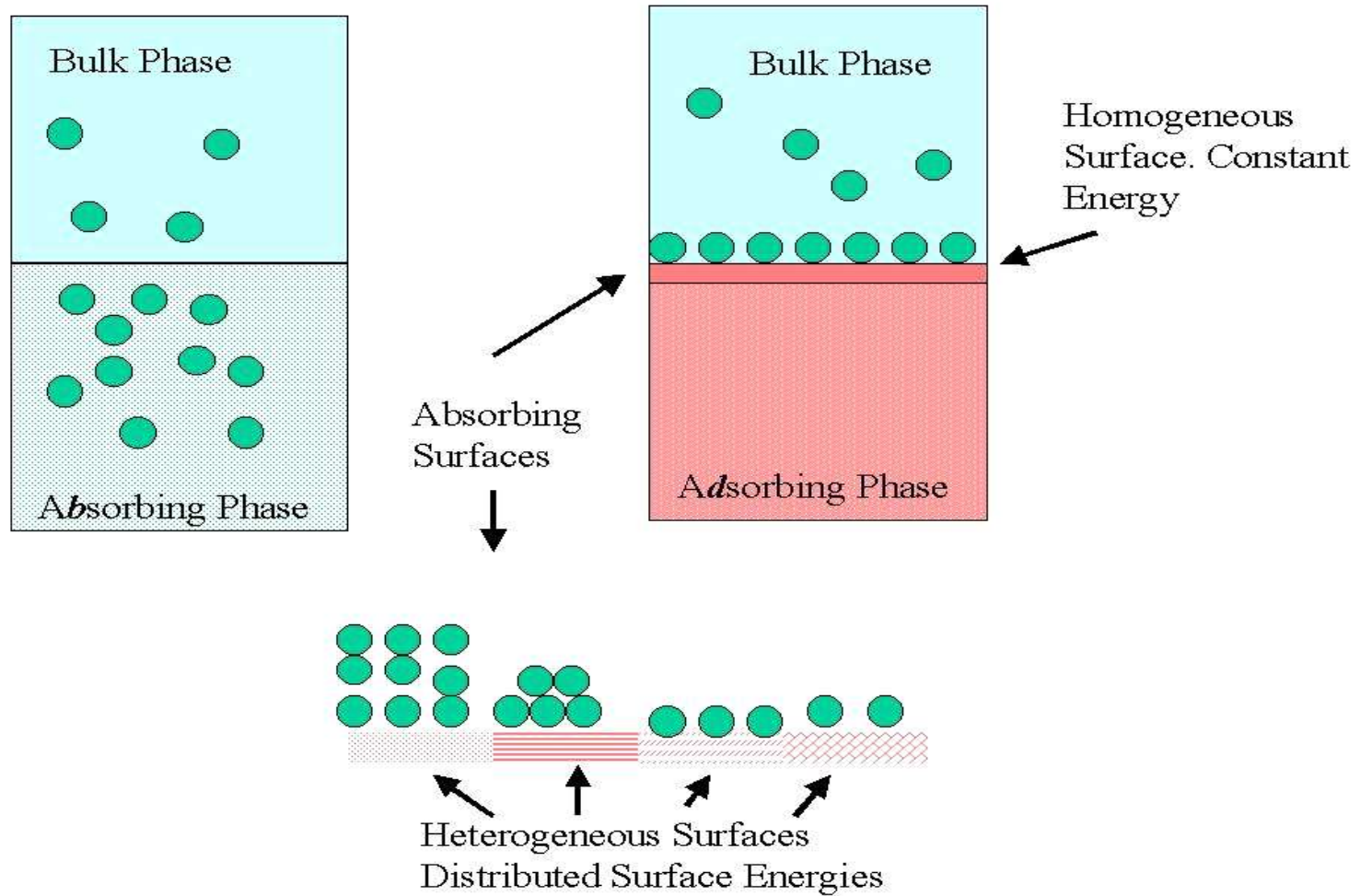
Soluto retenido = **Adsorbato**

Sólido sobre el que se retiene = **Adsorbente o Sorbente**

# ADSORCIÓN

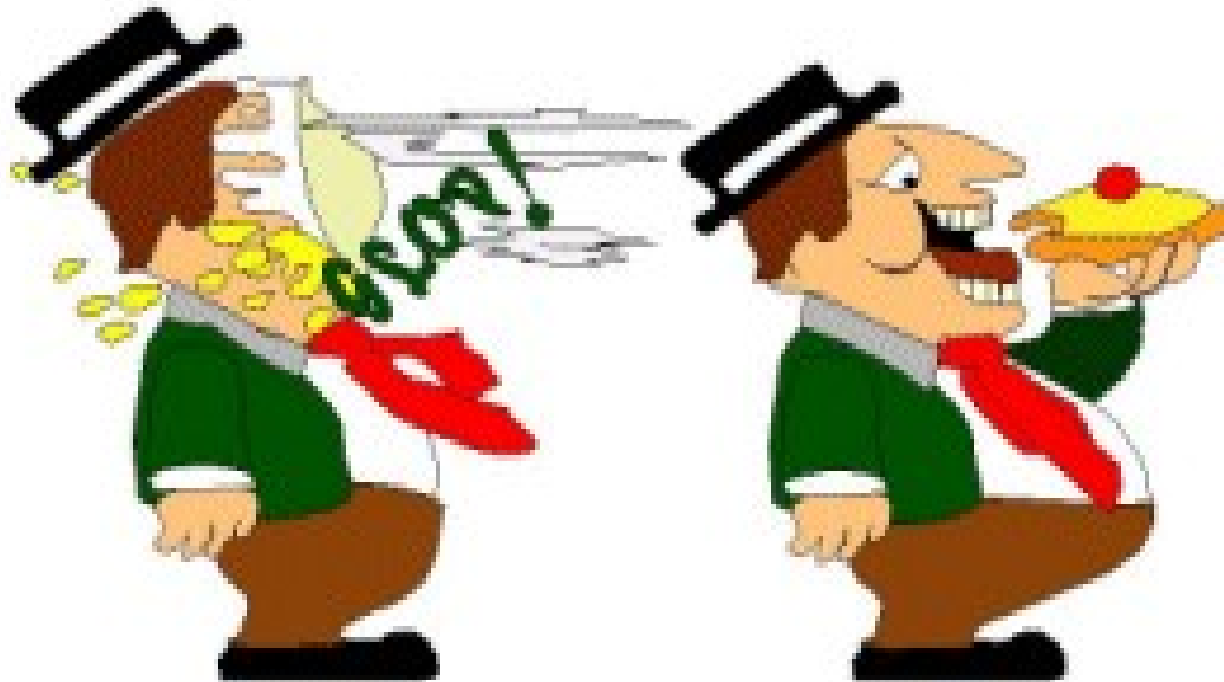
- ❖ La adsorción es el proceso en el que la materia se extrae de una fase y se concentra en la superficie de una segunda fase.  
(Acumulación de interfaz).
- ❖ Este es un fenómeno de superficie en comparación con la absorción donde fase de solución cambia en la materia, por ejemplo en la transferencia de gas.

# ADSORCIÓN

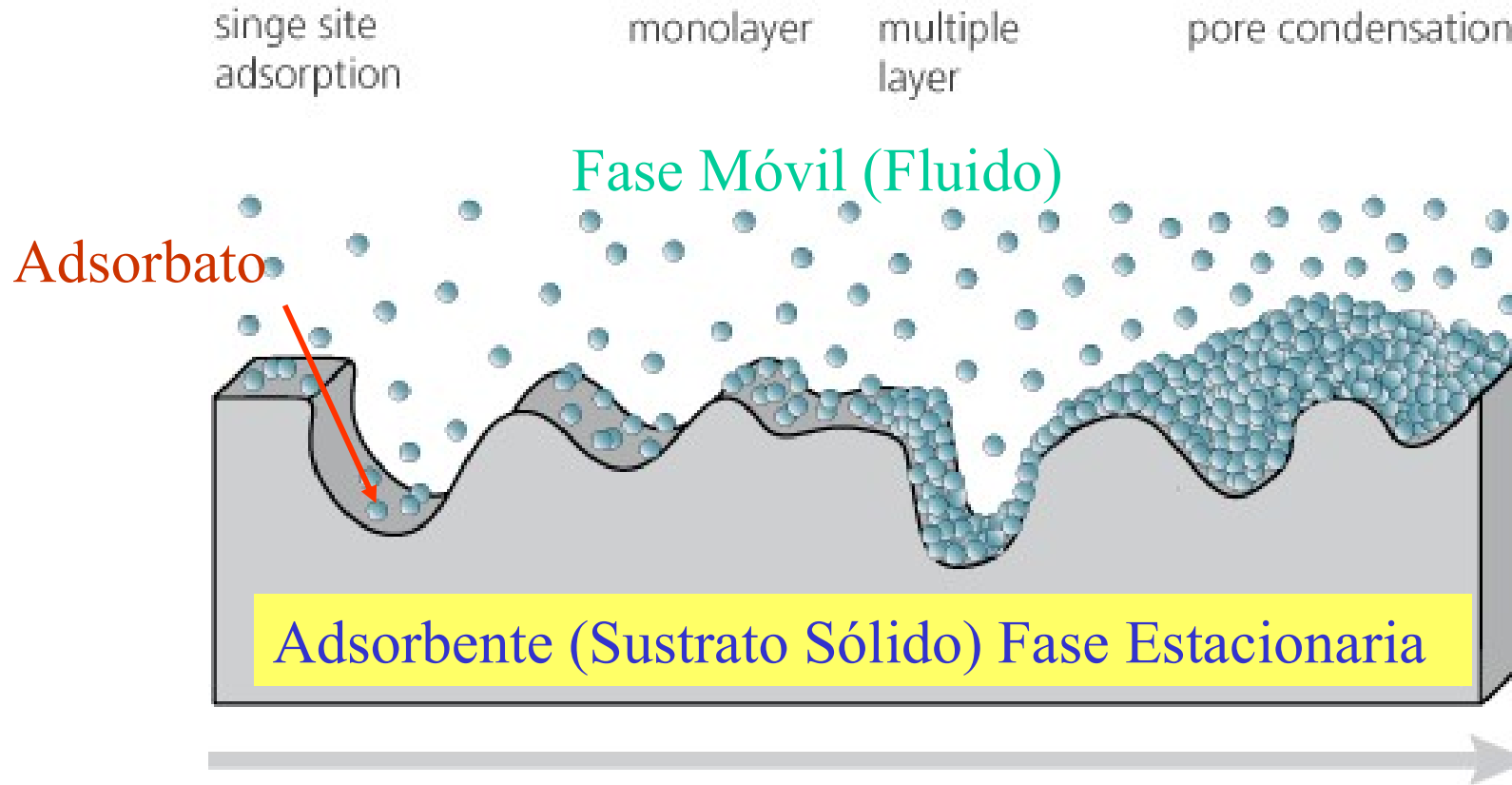


# Diferencias

Adsorption versus Absorption



## Transferencia de masa de la fase móvil hacia la fase estacionaria



Surface coverage increases with partial pressure in the gas phase.

# ADSORCIÓN

Si hay que eliminar el material soluble a partir de la fase de solución, pero el material no es ni volátil ni biodegradable, a menudo se emplean los procesos de adsorción.

## Aplicaciones Industriales

- ✓ Recuperación de solventes
- ✓ Reunir requerimientos sobre emisión de VOCs
- ✓ Remover trazas de HAPs : compuestos orgánicos policíclicos, dioxinas, furanos, pesticidas, fenólicos, complejos organicos sintéticos
- ✓ Remoción de trazas de gases malolientes (  $C < 100$  ppm )
- ✓ Remoción de vapores mercuriales
- ✓ Purificación de zumos de naranja (limonina)
- ✓ Eliminación de coloración por pardeamientos enzimáticos

# Energía Superficial

Una explicación de porqué el material se acumula en la interface se basa en el **exceso de energía** asociado con las partículas en la **interface**. Por ejemplo, en el caso de agua pura y aire, las moléculas de agua en la interface aire - agua tienen una energía más elevada que las moléculas de agua en el interior de la fase acuosa.

La razón de que esas moléculas en la superficie tengan más alta energía es que, a diferencia de las moléculas del interior, ellas tienen una componente de fuerza desbalanceada ( en el lado del aire de la molécula).



# Energía Superficial

Estas moléculas de superficie, tienen energía adicional para balancear las fuerzas. Estas usan la energía para poner moléculas en la superficie, dado que al menos uno de los enlaces internos debe romperse para tener la molécula en la superficie.

Este exceso de energía se denomina tensión superficial. Dado que esta toma energía para crear la superficie interfacial, el sistema tratará de minimizar el área total interfacial. Por lo que nosotros vemos gotas esféricas, meniscos, etc.

## FUERZAS QUE INTERVIENEN EN LA ADSORCIÓN

- ❖ Eléctricas: debidos a atracciones entre un soluto con cierta carga y puntos del adsorbente con carga contraria.
- ❖ Intercambio de adsorción (**intercambio iónico**) Proceso electrostático debido a sitios cargados en la superficie. La adsorción aumenta a medida que aumenta la carga iónica y cuando el radio de solvatación disminuye. Específica interacción soluto – sólido.
- ❖ Nota: La **solvatación** es el proceso de asociación de moléculas de un disolvente con moléculas o iones de un soluto. Al disolverse los iones en un soluto, se dispersan y son rodeados por moléculas de solvente. A mayor tamaño del ion, más moléculas de solvente son capaces de rodearlo, y más solvatado se encuentra el ion.

## FUERZAS QUE INTERVIENEN EN LA ADSORCIÓN

❖ **Adsorción física:** Fuerzas de Van der Waals, atracción débil entre adsorbato y adsorbente. La atracción no se fija a un sitio específico y el adsorbato es relativamente libre de moverse en la superficie. Estas fuerzas, al ser relativamente débiles, producen un proceso reversible, y capaz de adsorción en múltiples capas. Esta es considerada la verdadera adsorción

❖ **Adsorción química (quimisorción):** Algún grado de unión o reacción química entre adsorbato y adsorbente caracterizada por fuerte atractivo. Moléculas adsorbidas no son libres de moverse en la superficie. Hay un alto grado de especificidad y, normalmente, una monocapa se forma. El proceso es reversible rara vez.

❖ Por lo general una combinación de adsorción física y química es la responsable de la adsorción con carbón activado en agua y aguas residuales.

# Equilibrio de Adsorción

- ❖ Si el adsorbente y el adsorbato se ponen en contacto el tiempo suficiente, se obtiene un equilibrio establecido entre la cantidad de adsorbato adsorbido y la cantidad de adsorbato en solución.
- ❖ La relación de equilibrio se describe por las **isotermas**.

# Equilibrio de Adsorción

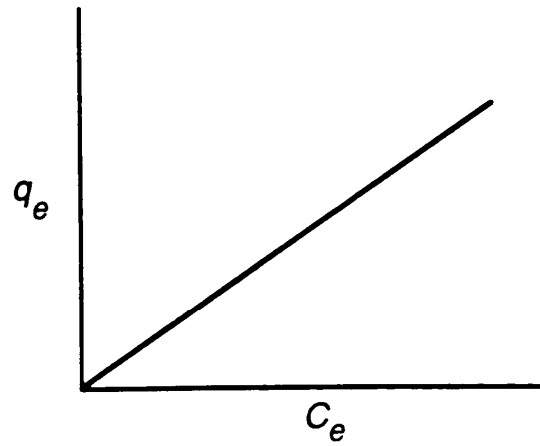
Definimos lo siguiente:

$q_e$  = masa de material adsorbido (en el equilibrio) por masa de adsorbente.

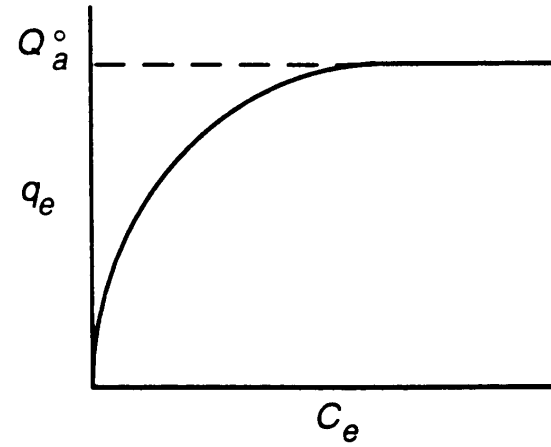
$C_e$  = concentración de equilibrio en solución cuando la cantidad adsorbida es igual  $q_e$ .

$q_e / C_e$  relaciones que dependen del tipo de adsorción que se produce, de múltiples capas, química, adsorción física, etc.

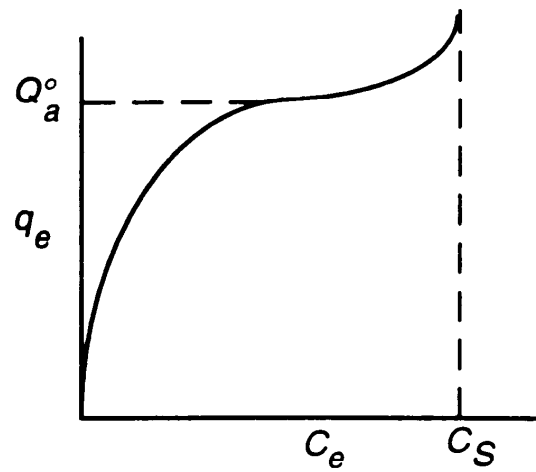
# Modelos de Isotermas



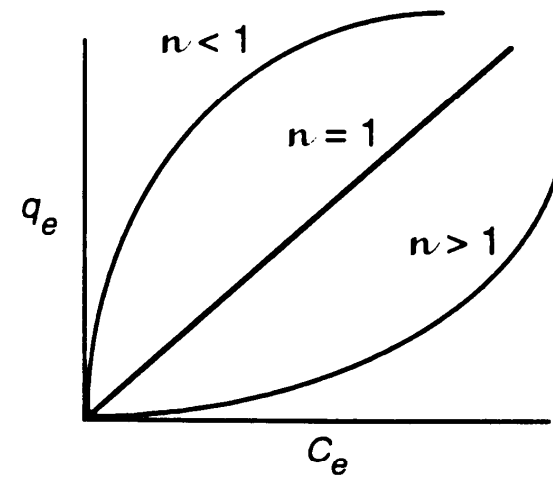
(a) Linear



(b) Langmuir



(c) BET



(d) Freundlich

## Isoterma de Langmuir

- Este modelo supone la cobertura de monocapa y la energía constante de unión entre la superficie y el adsorbato. El modelo es:

$$q_e = \frac{K \cdot Q_a^0 \cdot C_e}{1 + K \cdot C_e}$$



## Isoterma de Langmuir

$Q_a^0$  = representa la máxima capacidad de adsorción  
(cobertura monocapa) (g de soluto / g de adsorbente)

■  $C_e$  = tiene unidades de (mg / litro)

■  $K$  = tiene unidades de (litro / mg)

## Isoterma de BET (Brunauer, Emmett y Teller)

- Esta es una forma más general, multi-capa del modelo.
- Se supone que una isoterma de Langmuir se aplica a cada capa y que no se produce transmigración entre capas.
- También se asume que hay una energía de adsorción igual para cada capa excepto para la primera capa.

$$q_e = \frac{K_B \cdot C_e \cdot Q_a^0}{(C_S - C_e) \{1 + (K_B - 1)(C_e / C_S)\}}$$

## Isoterma de B.E.T.

- $C_S$  = concentración de saturación (límite de solubilidad) del soluto. (mg / litro)
- $K_B$  = un parámetro relacionado con la intensidad de unión para todas las capas.
- Nota: cuando  $C_e \ll C_S$  y  $K_B \gg 1$  y  $K = K_B / C_S$  la isoterma BET se acerca a la isoterma de Langmuir.

## Isoterma de Freundlich

- Para el caso especial de las energías superficiales heterogéneas (particularmente bueno para los residuos mezclados) en la que el término de energía " $K_F$ ", varía como una función de la cobertura de la superficie se utiliza el modelo de Freundlich.

$$q_e = K_F C_e^{1/n}$$

- $n$  y  $K_F$  son constantes específicas del sistema

## Determinación del Modelo Apropriado

- Para determinar cuál es el modelo a utilizar para describir la adsorción de un determinado sistema adsorbente / adsorbato, se suelen ejecutar isothermas experimentales.
- Los datos de estos experimentos de isothermas se analizan entonces usando los siguientes métodos que se basan en la linealización de los modelos.

## Determinación del Modelo Apropriado

- Para el modelo de Langmuir, la linealización da:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K \cdot Q_a^0} + \frac{C_e}{Q_a^0}$$

- Una gráfica de  $C_e/q_e$  vs  $C_e$  da una línea recta con una intercepción en:

$$\frac{1}{K \cdot Q_a^0}$$

## Determinación del Modelo Apropriado

- Y una pendiente:

$$\frac{1}{Q_a^0}$$

- Ó:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{Q_a^0} + \frac{1}{K \cdot Q_a^0} \cdot \frac{1}{C_e}$$

- Una gráfica de  $1/q_e$  versus  $1/C_e$  da una línea recta con una intercepción en  $1/Q_a^0$  y una pendiente :

$$\frac{1}{K \cdot Q_a^0}$$

## Determinación del Modelo Apropriado

- Para la Isoterma de Freundlich se utiliza una gráfica log-log:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C$$

- Una gráfica de log - log da una línea recta con una intercepción en  $\log K_F$  y una pendiente  $1/n$ .



## Determinación del Modelo Apropriado

- Para la Isoterma de B.E.T. podemos arreglar la ecuación para que nos dé:

$$\frac{C_e}{(C_S - C_e) \cdot q_e} = \frac{K_B - 1}{K_B \cdot Q_a^0} \cdot \frac{C_e}{C_S} + \frac{1}{K_B \cdot Q_a^0}$$

$$\text{Intercepción} = \frac{1}{K_B \cdot Q_a^0}$$

$$\text{Pendiente} = \frac{K_B - 1}{K_B \cdot Q_a^0 \cdot C_S}$$

# Factores que Afectan la Adsorción

Factores que afectan la medida de adsorción (y por lo tanto afectar isoterma) son:

- Adsorbato:
  - Solubilidad  
En general, cuando la solubilidad del soluto **aumenta** el grado de adsorción disminuye. Esto se conoce como la "Regla Lundelius". El vinculo Sólido - sólido de la superficie compite con la atracción soluto-disolvente.
  - Factores que afectan la solubilidad incluyen el tamaño molecular (MW alta-baja solubilidad), ionización (solubilidad es mínima cuando los compuestos no están cargados), la polaridad ( a medida que aumenta la polaridad se obtiene una mayor solubilidad porque el agua es un disolvente polar).

# Factores que Afectan la Adsorción

## Adsorbato:

- pH  
El pH a menudo afecta a la carga de la superficie del adsorbente, así como la carga en el soluto. Generalmente, para el material orgánico como el pH desciende, la adsorción aumenta. .
- Temperatura  
Reacciones de adsorción son típicamente exotérmica es decir,  $\Delta H_{\text{rxn}}$  es generalmente negativa. Aquí calor desprendido por la reacción tanto como T medida aumenta disminuye la adsorción
- Presencia de otros solutos  
En general, hay competencia para obtener un número limitado de sitios por lo tanto se obtiene una reducida extensión de adsorción de un material específico.

# Factores que Afectan la Adsorción

## Adsorbente:

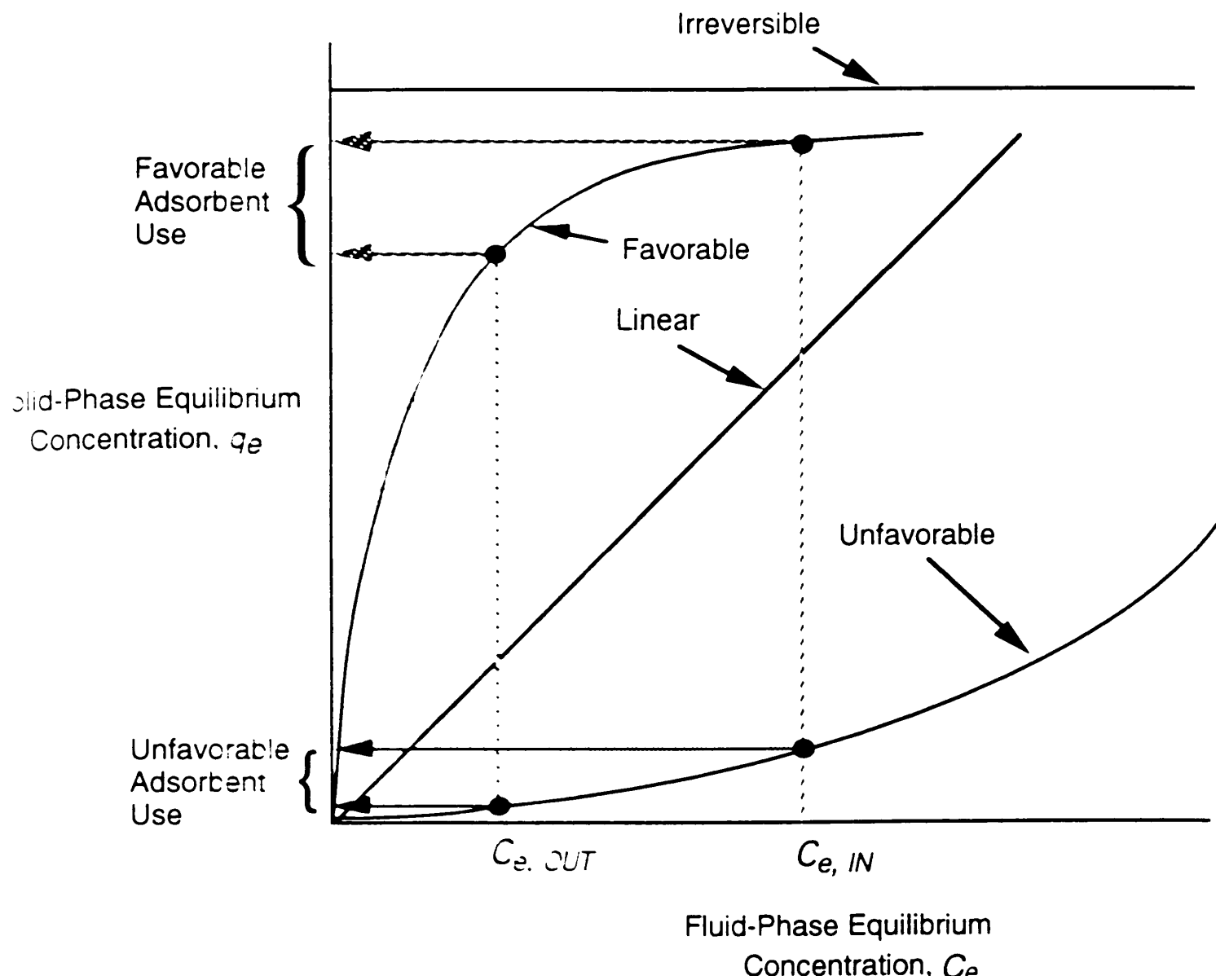
✓ Prácticamente cada superficie sólida tiene la capacidad de adsorber los solutos. Desde el punto de tratamiento de aguas residuales / agua de vista de carbón activado (AC) es el adsorbente de elección. AC preparado a partir de muchas fuentes:

- ✓ madera
- lignito
- carbón
- cáscaras de nuez
- hueso

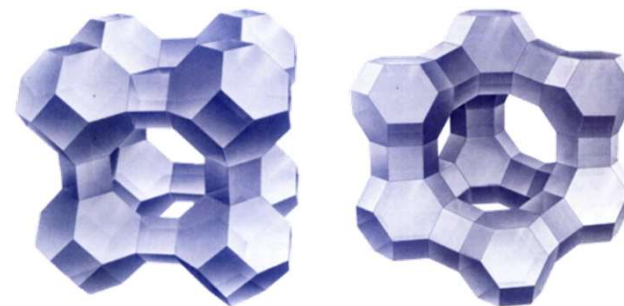
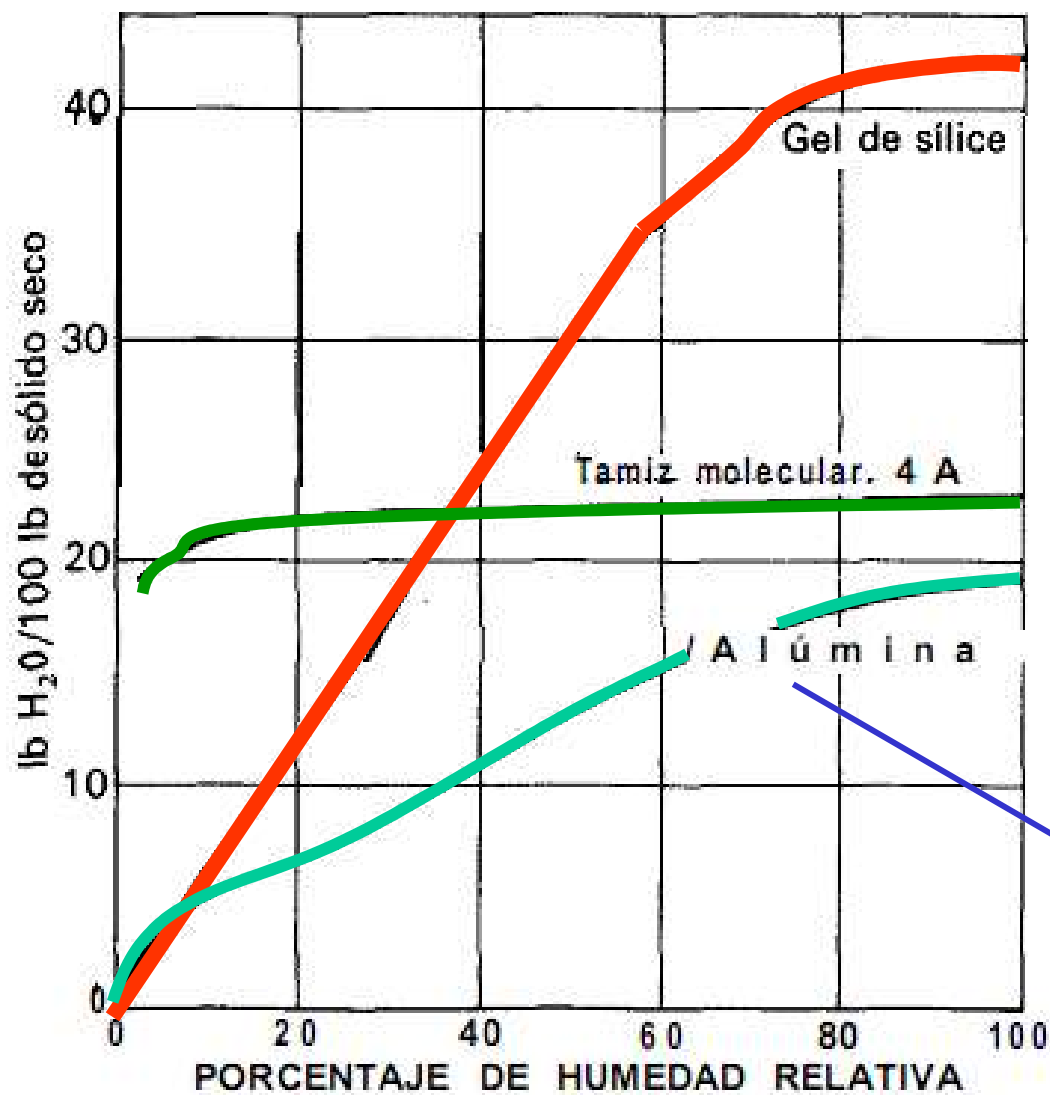
# Isotermas de Adsorción

- ❖ La Relación de Equilibrio entre la Cantidad de material que se Adsorbe y la cantidad que está en la Fase Gaseosa se conoce como **Isoterma de Adsorción**.
- ❖ La **Isoterma de Adsorción** es una Curva Característica de la Capacidad de Equilibrio de Adsorbato por unidad de masa de Adsorbente vs. Concentración de Adsorbato a **P y T** cte.

# Isotermas de Adsorción



# Isotermas de Adsorción



Por las características del mecanismo dominante, que dependen del adsorbente y del adsorbato, los procesos de adsorción pueden clasificarse en:

- ❖ **Adsorción Física** → Fzas. De London – V. Der Waals  
**Proceso Reversible**
- ❖ **Adsorción Química** → Se forman enlaces covalentes.  
**Proceso Irreversible**



# ADSORCIÓN

- La adsorción física está causada principalmente por la fuerza de van der Waals y fuerzas electrostáticas entre las moléculas de adsorbato y los átomos que componen la superficie del adsorbente. Así los adsorbentes se caracterizan primero por las propiedades superficiales tales como área de superficie y la polaridad.

# ADSORCIÓN

- Una gran área superficial específica es preferible para proporcionar gran capacidad de adsorción, pero la creación de una gran superficie interna en un volumen limitado, inevitablemente da lugar a un gran número de poros de pequeño tamaño entre las superficies de adsorción.
- El tamaño de microporo determina la accesibilidad de las moléculas de adsorbato a la superficie de adsorción por lo que la distribución del tamaño de microporos es otra propiedad importante para caracterizar capacidad de adsorción de los adsorbentes.

# Influencia de la distancia

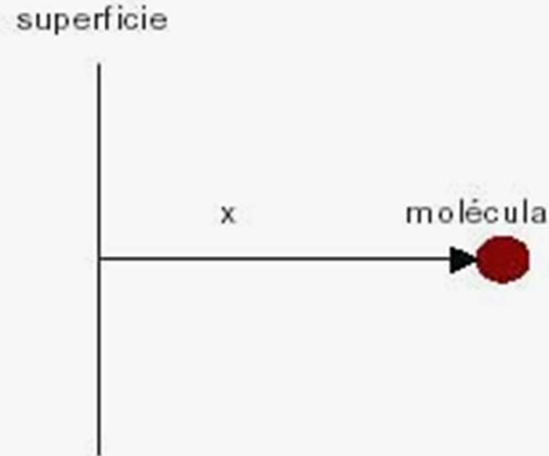


Figura 1. Distancia entre la Molécula y la Superficie

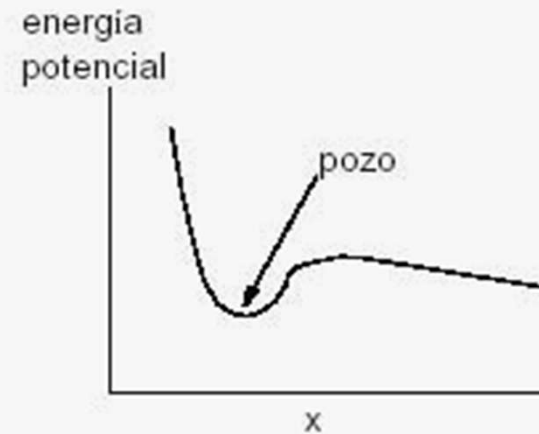
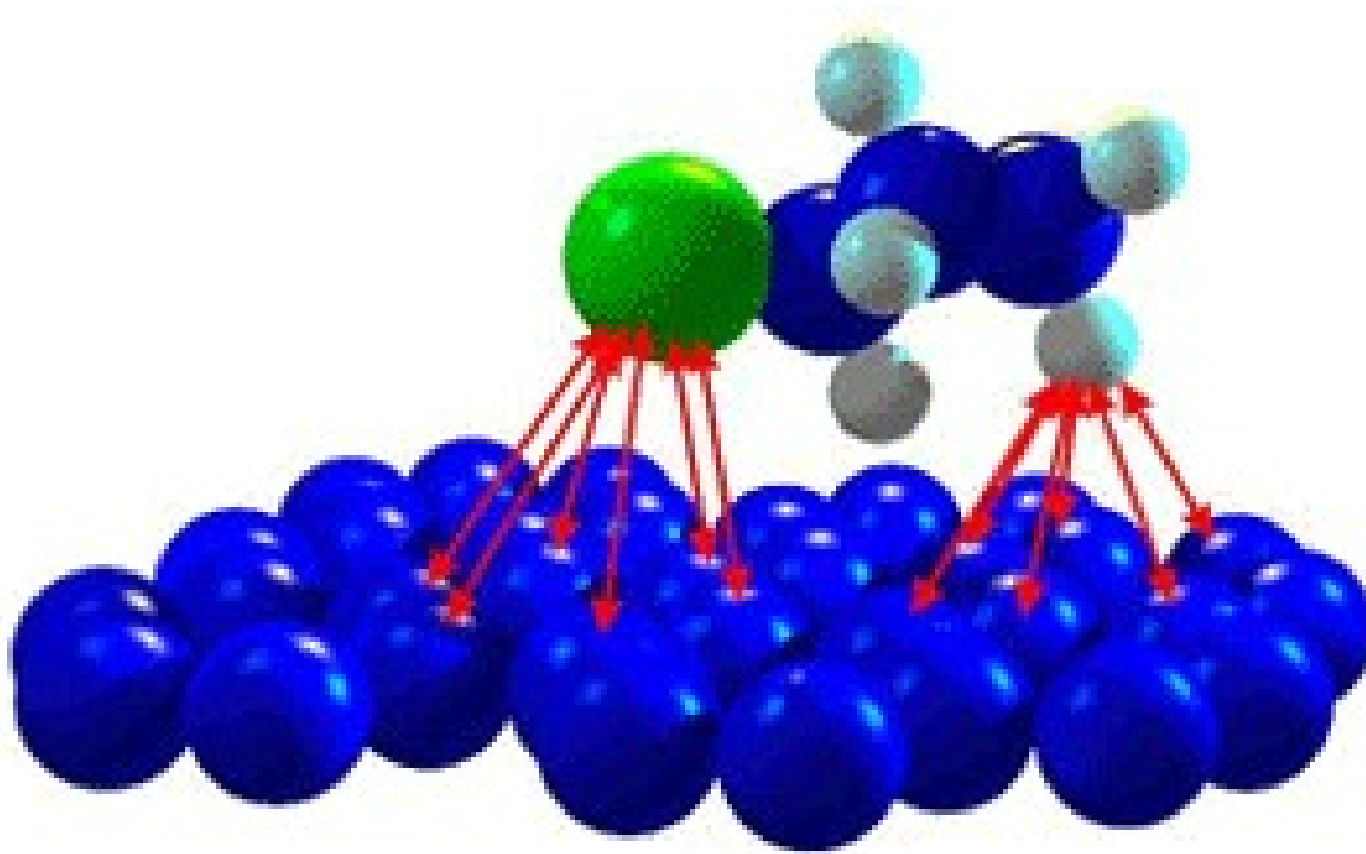


Figura 2. Energía Potencial vs. Distancia

# Influencia de la distancia



Ing. Hector Perez - FI UNCUYO -  
Operaciones Unitarias

## MECANISMOS DE ADSORCION

Por su forma de comportarse, existen **2 tipos de fases estacionarias** que dan lugar a dos procesos principales:

### ☾ **Adsorción**

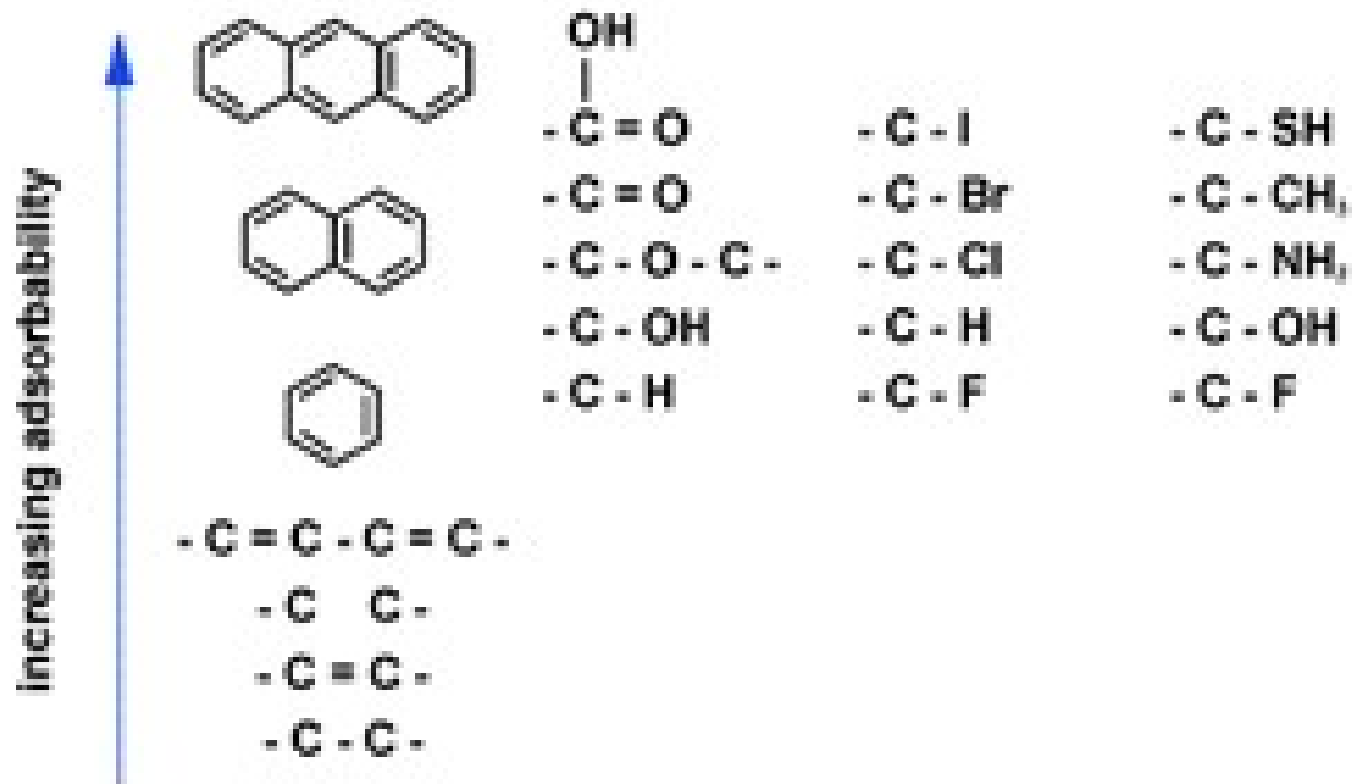
### ☾ **Intercambio Iónico**

- En el caso de la **adsorción** el fenómeno tiene lugar sobre la **superficie del sólido** donde la mayor parte del soluto queda retenido.
- En el **intercambio iónico** el material tiene la propiedad de tomar partículas cargadas (iones positivos o negativos) que quedan **retenidas y fijadas** ya no como lo que ocurre con al adsorción en la superficie, sino en el **interior**.

## MECANISMOS DE ADSORCION

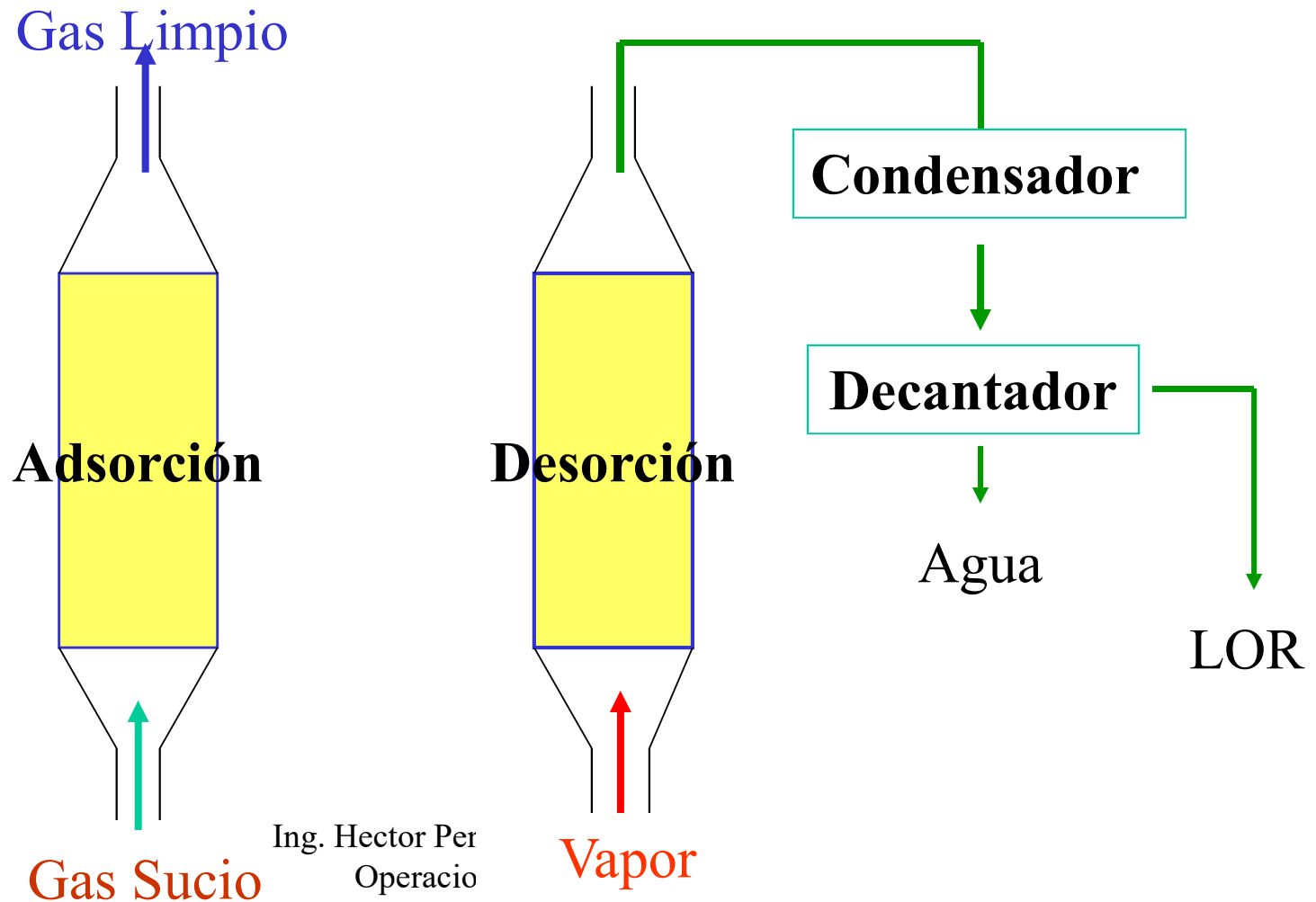
Para ambos procesos **NO existe** una distribución uniforme en todo el cuerpo del adsorbente sino que la adsorción ocurre preferentemente en la superficie, mientras que en el intercambio iónico, se produce sobre ciertas regiones preferenciales

# Influencia del Tamaño Molecular y los Grupos Funcionales



Los adsorbentes son:

- **Materiales Porosos de gran superficie específica**
- **Poros de pequeño tamaño ( nanómetros )**





# Adsorbentes

☯ Carbón Activado → Moléculas No Polares

☯ Alúmina Activada ( alumina hidratada, Si, Ze) → Oxidos y mercaptanos de HC y F del Agua. Desecante. Separación de HC.

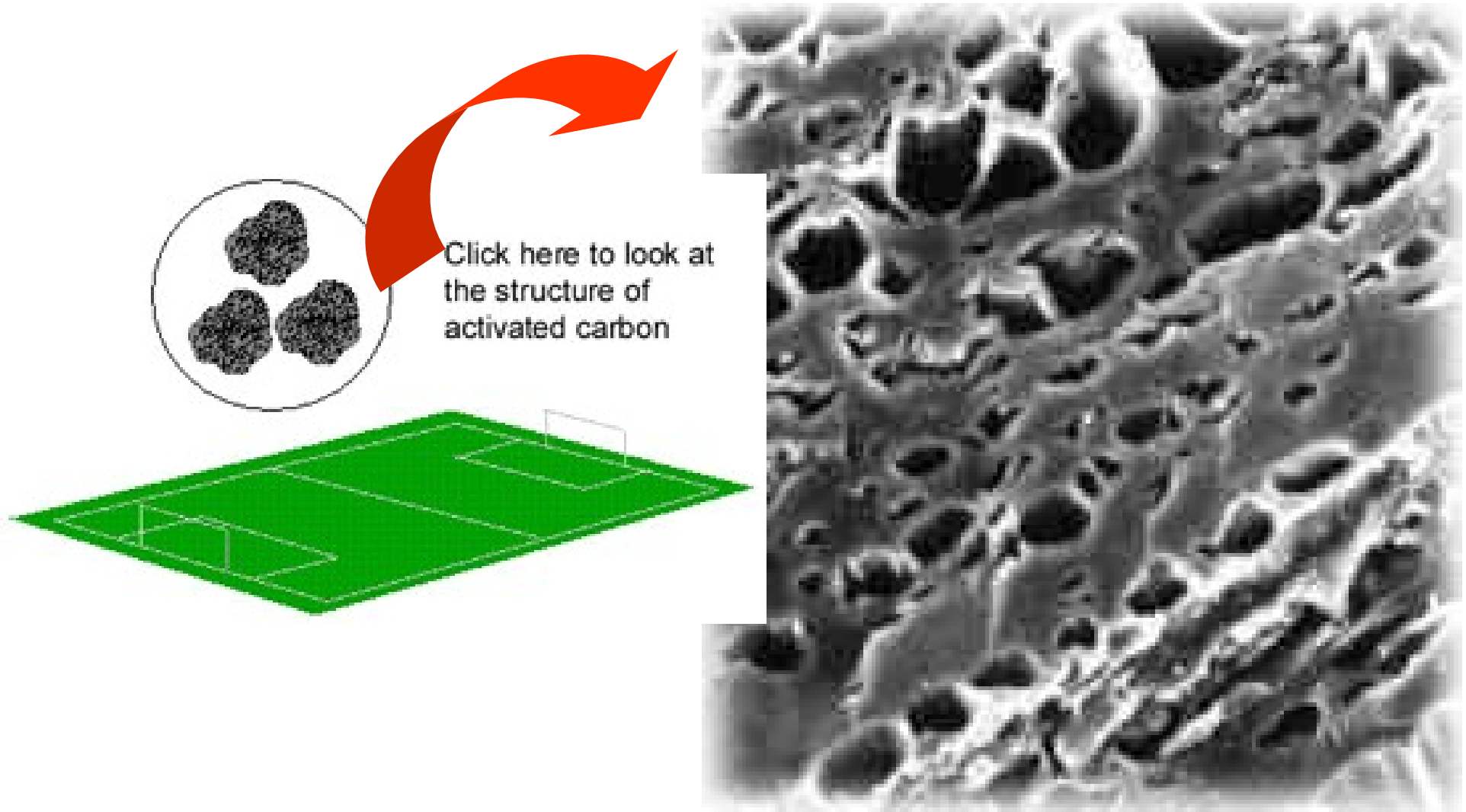
## Factores que afectan la Capacidad de un Adsorbente

- Área Superficial
- Tamaño de Poro
- Polaridad

<b>Adsorbente</b>	<b>Porosidad Interna %</b>	<b>Densidad en Seco g/cm<sup>3</sup></b>	<b>Diámetro de Poro Promedio A</b>	<b>Área Superficial m<sup>2</sup>/g</b>
Alúmina Activa	25-30	0.8	35-45	235
Carbón en base a Petróleo	65-85	0.48	18-20	800-1100
Bauxita Activada	35	0.85	50	Variable
Sílica Gel	varias	0.43 – 0.73	varios	300 - 800
Carbón Vegetal	30 - 75	0.14 – 0.56	5 - 100	600 - 1500

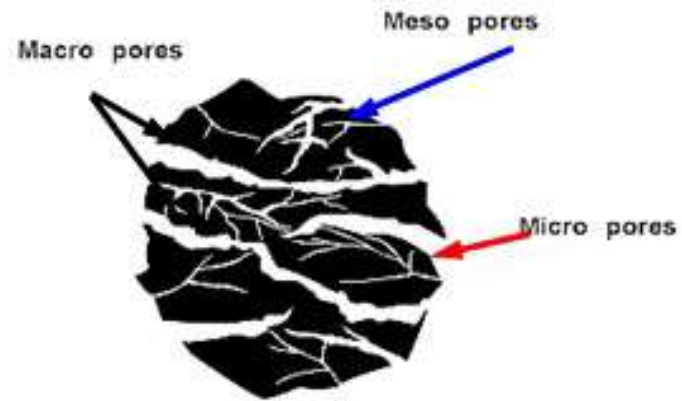
<b>Diámetro de la Esfera en mm</b>	<b>Área Superficial, m<sup>2</sup> / g</b>
<b>0.001</b>	<b>6</b>
<b>0.01</b>	<b>0.6</b>
<b>0.1</b>	<b>0.06</b>
<b>1</b>	<b>0.006</b>

## Superficie Expuesta del Grano

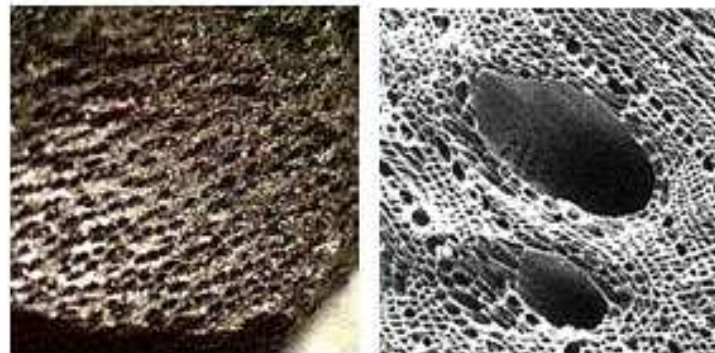


Ing. Hector Perez - FI UNCUYO -  
Operaciones Unitarias

# Características de Carbón Activado - Poros

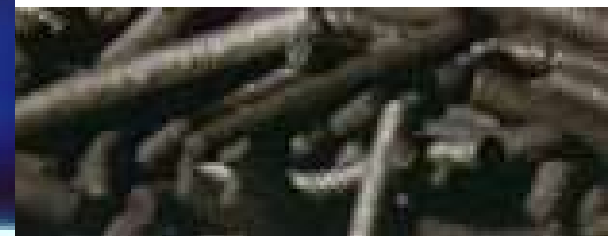
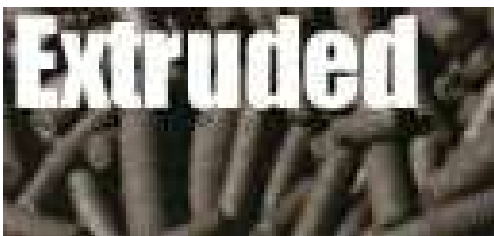
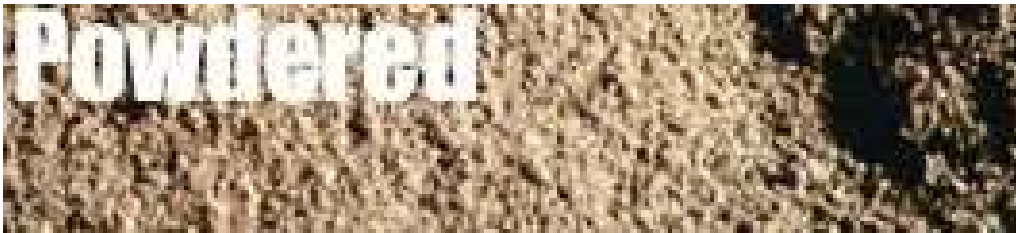


**Figure 1:** Activated carbon structure - schematic.

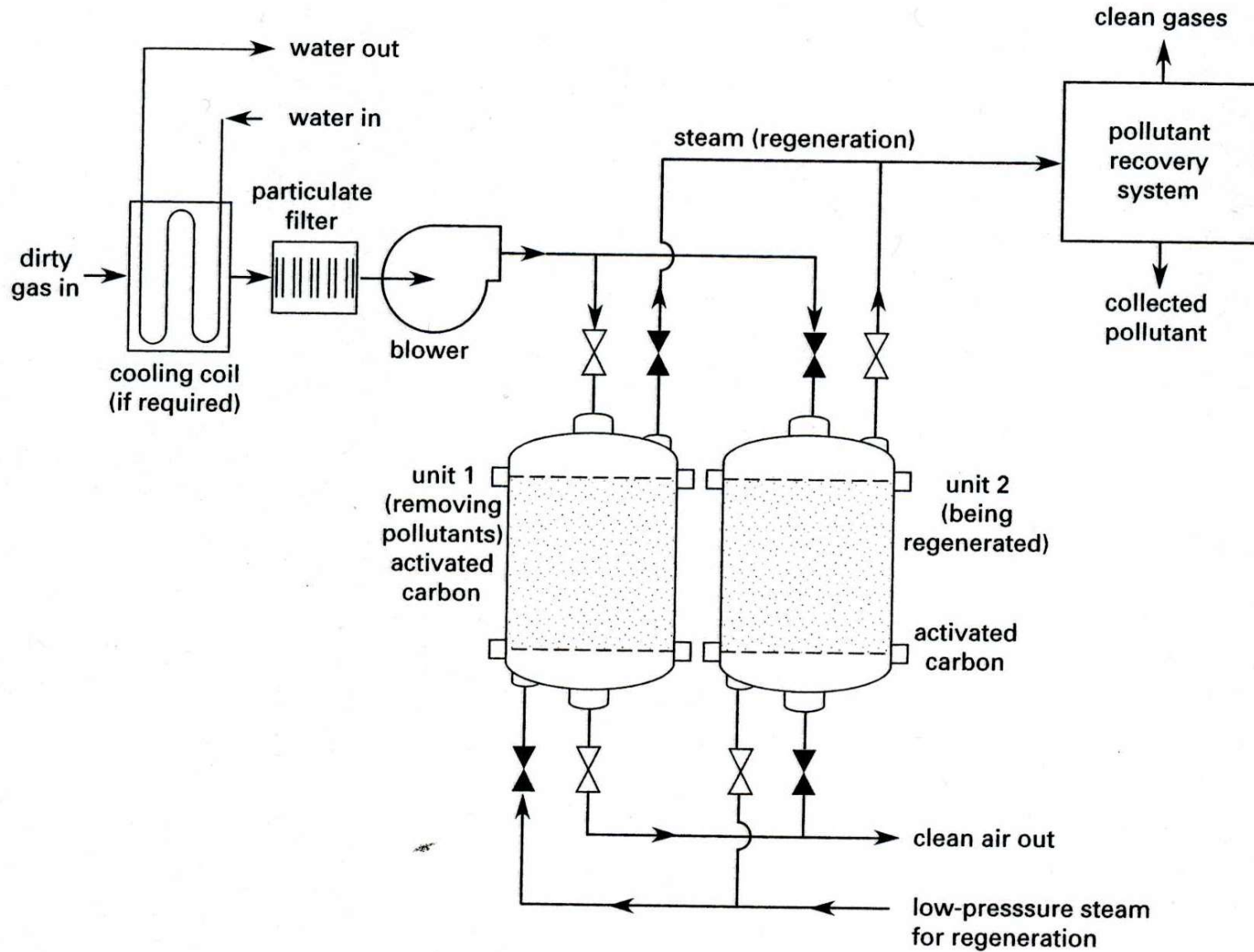


**Figure 2:** Activated carbon structure – SEM pictures.

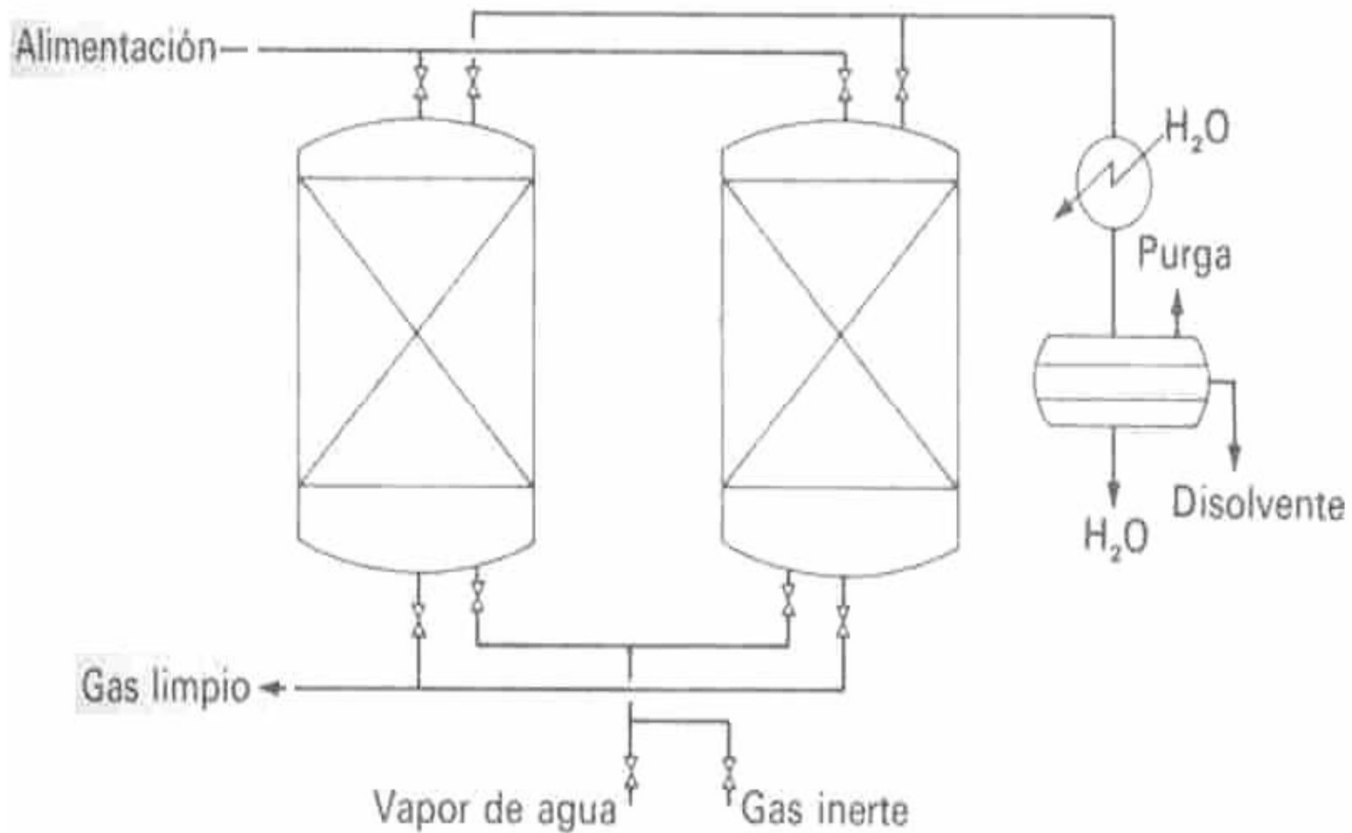
# Diferentes Formas Físicas del Carbón Activado



# Esquema de un Equipo Industrial de Adsorción - Desorción



## Esquema de un Equipo Industrial de Adsorción - Desorción



Ing. Hector Perez - FI UNCUYO -  
Operaciones Unitarias



## Esquema de un Equipo Industrial de Adsorción - Desorción

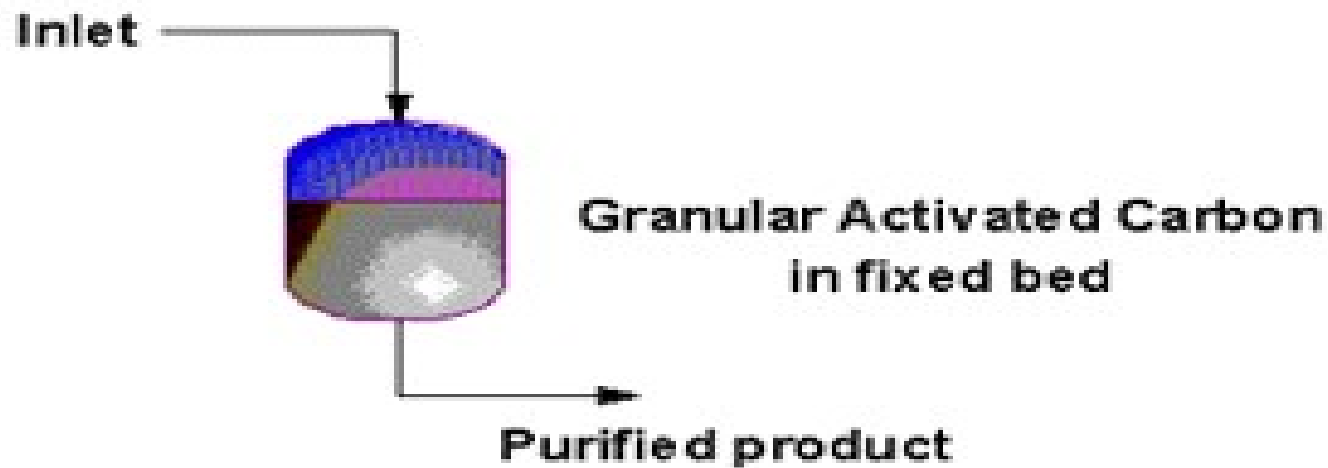


Ing. Hector Perez - FI UNCUYO -  
Operaciones Unitarias

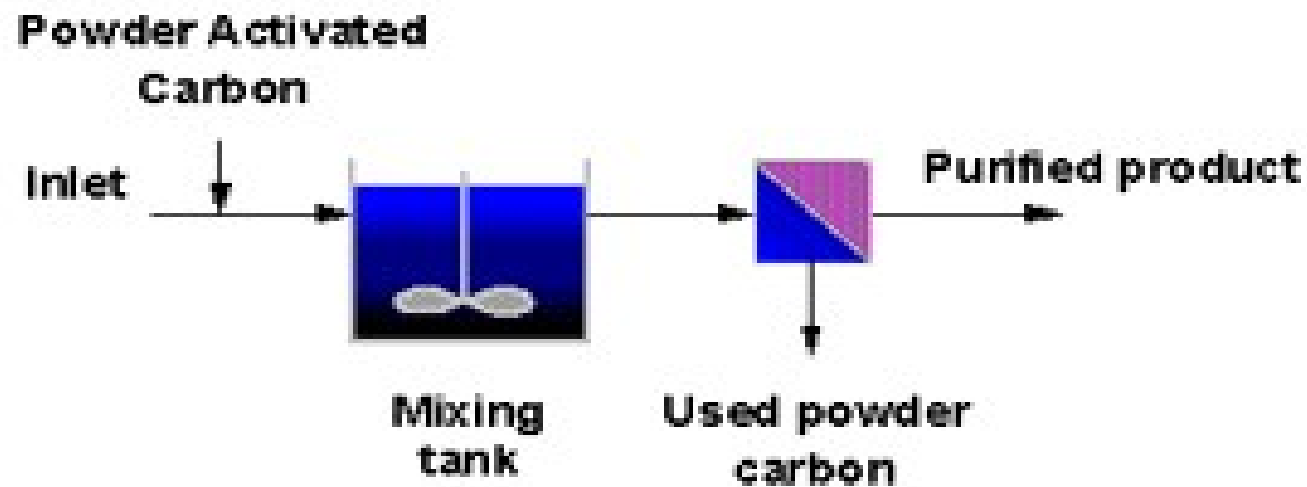
## Esquema de un Equipo Industrial de Adsorción - Desorción



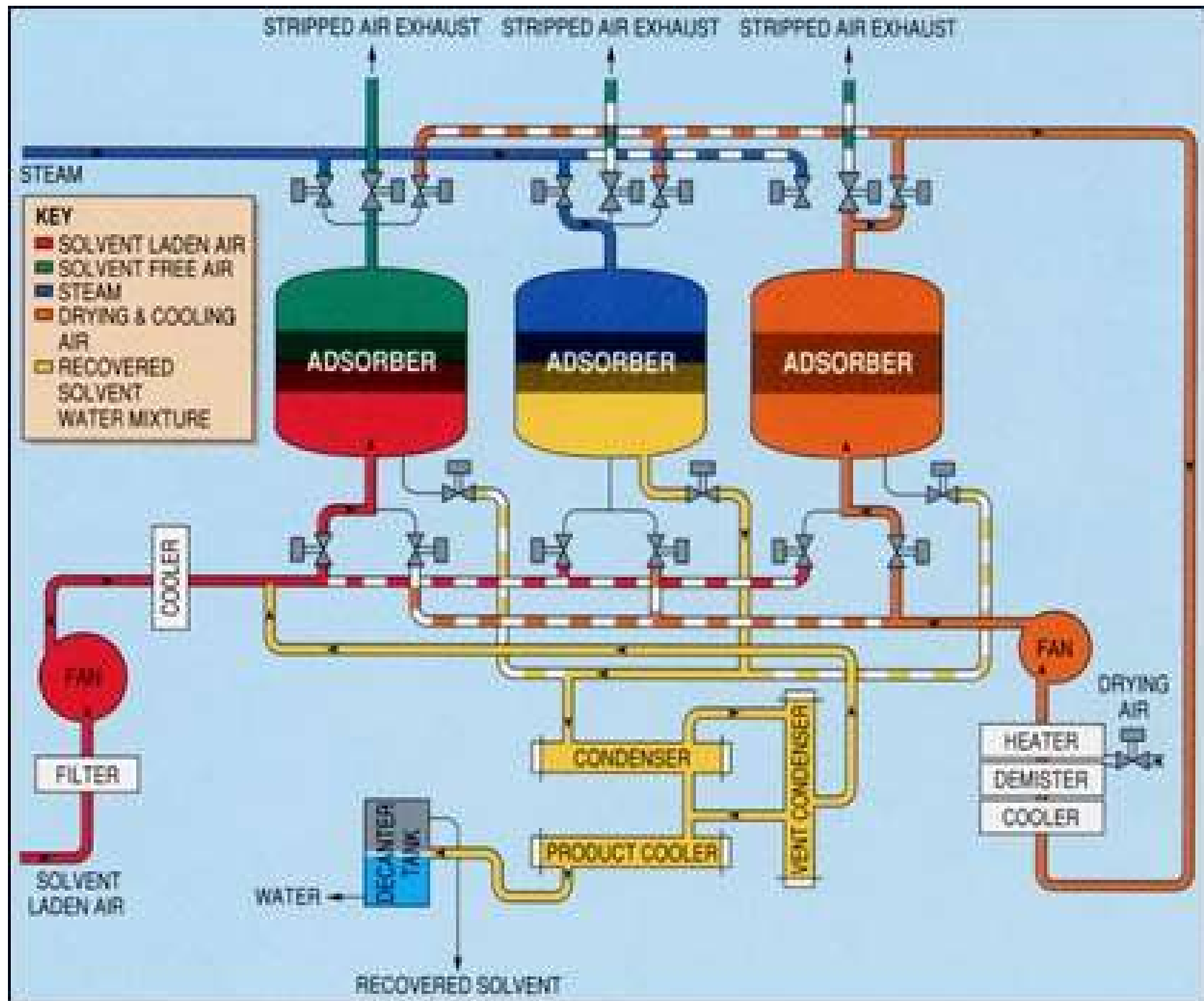
Ing. Hector Perez - FI UNCUYO -  
Operaciones Unitarias



**Principle of a granular activated carbon adsorption system**



**Principle of a powder activated carbon adsorption system**



# Dinámica de la Adsorción

Podemos reconocer 3 pasos:

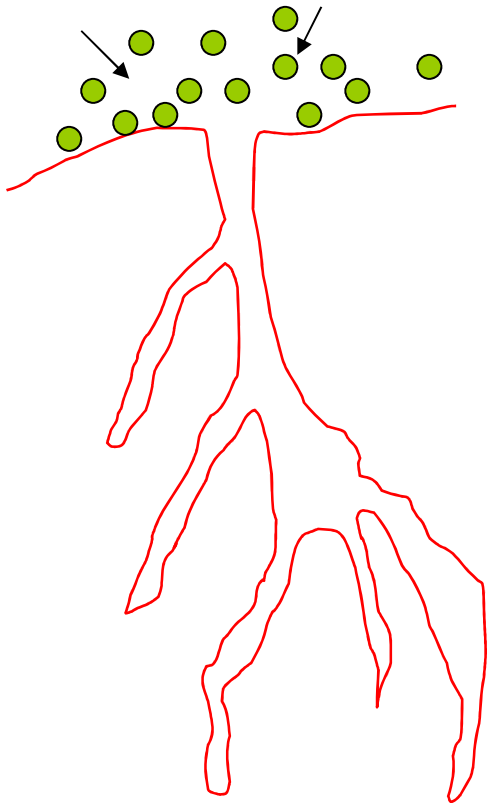
1. **Difusión** hacia la Superficie Adsorbente
2. **Migración** dentro de los Poros del Adsorbente
3. **Crecimiento** de una Monocapa de Adsorbato

# Dinámica de la Adsorción

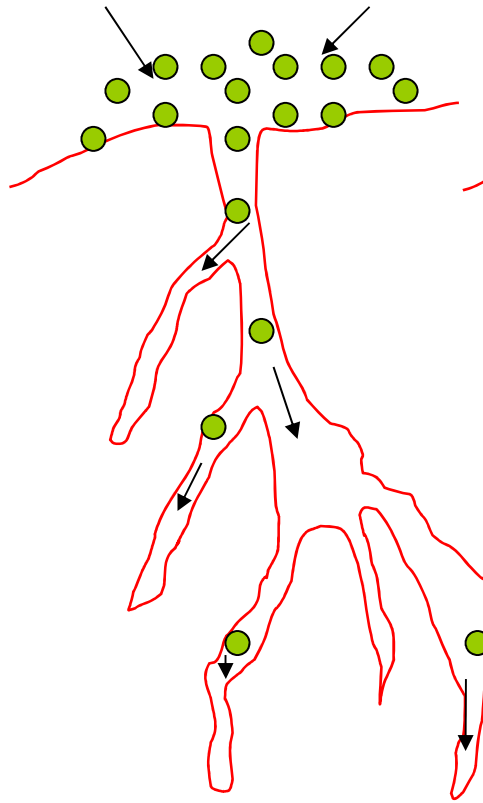
Adsorción sobre AC (carbón activado) generalmente se modela como un proceso de tres pasos consecutivos.

Estos pasos son de transporte de película (a través de la capa límite estancada sobre la partícula AC); transporte del soluto a través de los poros internos, y finalmente adsorción a la superficie del sitio. Uno o más de estos pasos pueden limitar la velocidad de adsorción de soluto. En la mayoría de los casos, el proceso real de adsorción no limita el proceso. En algunos casos los límites de transporte de película y en otros casos (lo más probable) de poros que limitan el proceso de difusión.

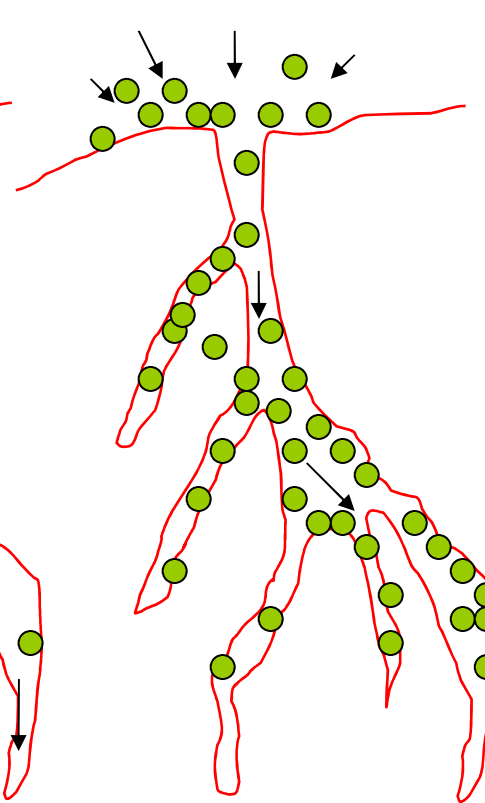
**Paso 1: Difusión  
hacia la Superficie  
Adsorbente**



**Paso 2: Migración hacia  
los Poros del Adsorbente**



**Paso 3: Crecimiento de  
la Monocapa de  
Adsorbato**



# Dinámica de la Adsorción

Depende de:

- ❖ Propiedades Físicas y Químicas del Adsorbente
  - ✓ Composición
  - ✓ Tamaño de Partícula
  - ✓ Espesor del Medio
  - ✓ Área superficial Total
  - ✓ Volumen Poral
- ❖ Concentración y propiedades Físicas y Químicas del Adsorbato
- ❖ Concentración de otros Gases y Vapores Adsorbibles



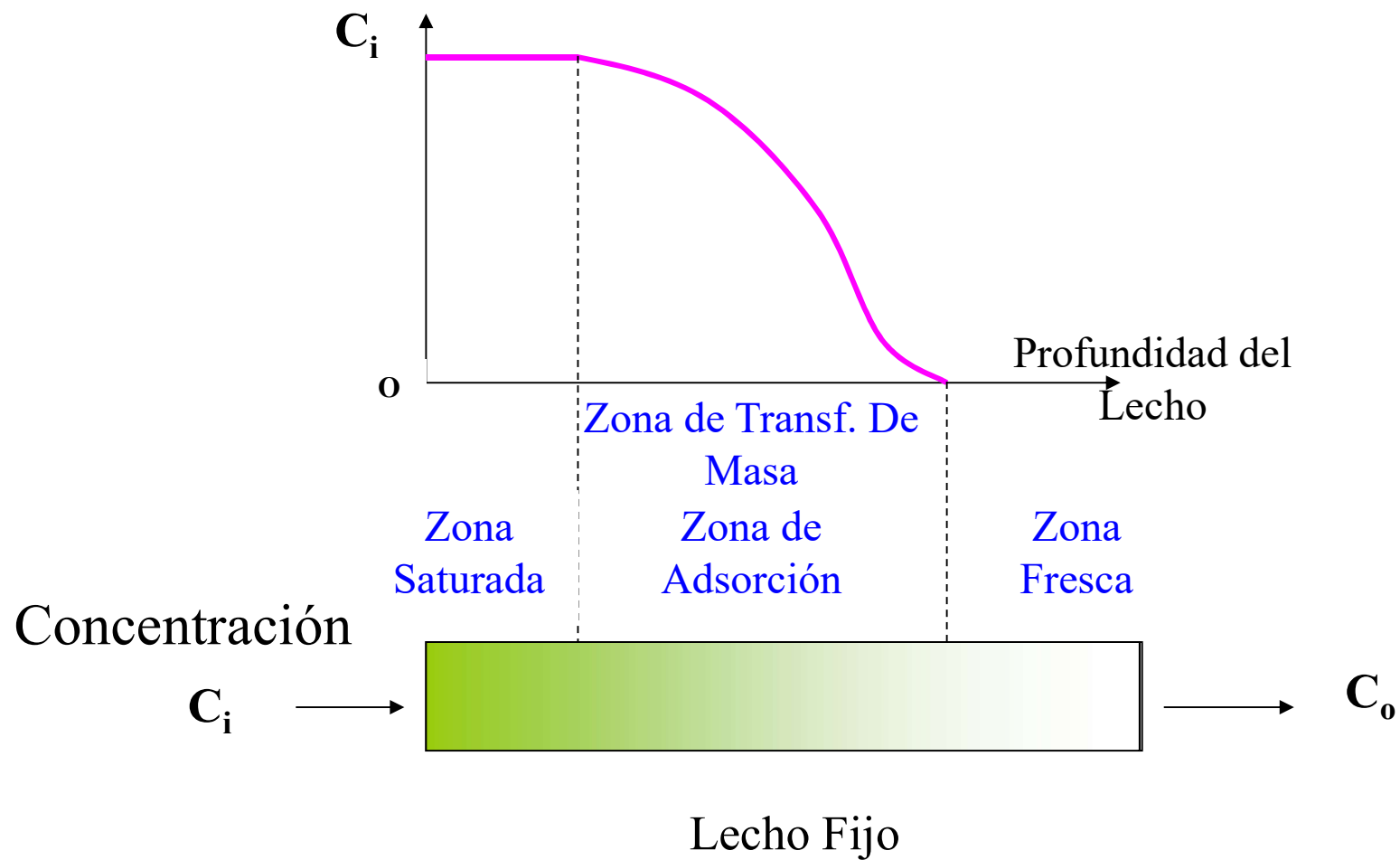
# Dinámica de la Adsorción

Depende de:

- ❖ Temperatura
- ❖ Tiempo de Residencia del Adsorbato en el Lecho

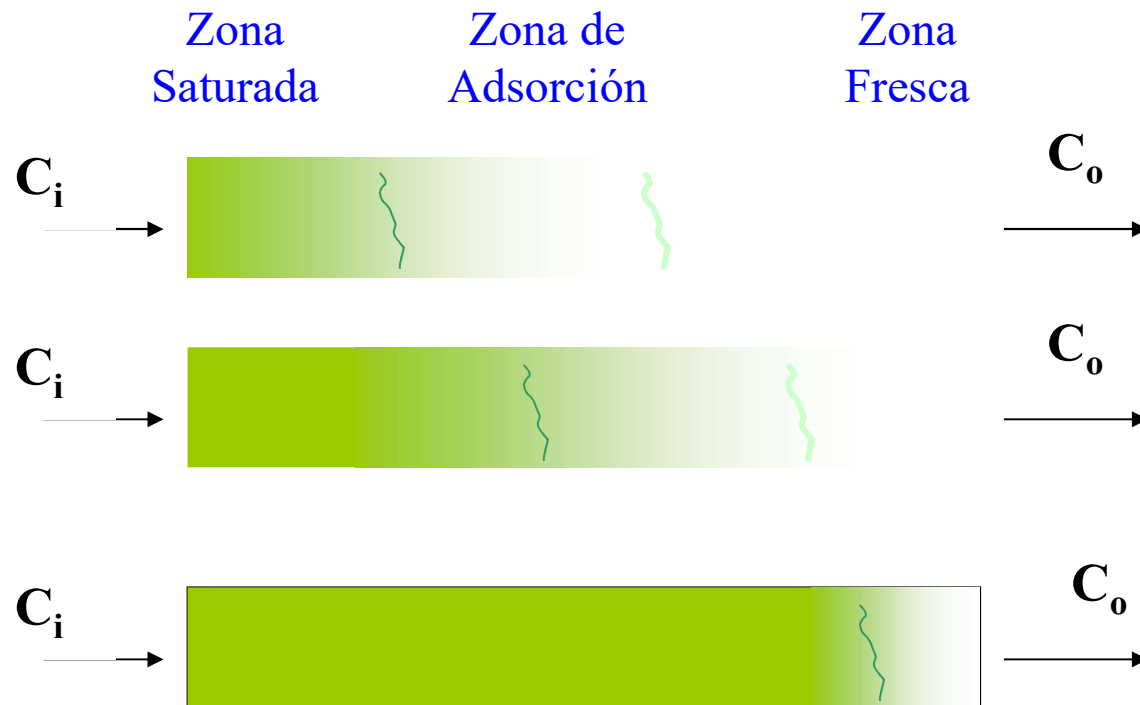
# Dinámica de la Adsorción

- El adsorbente más cercano al gas ingresante es el primero en convertirse en Saturado
- El agente contaminador rápidamente se agota, y por lo tanto hay muy poca adsorción más lejos a través del sistema.
- Más allá de la Zona de Saturación existe una región parcialmente en equilibrio con el Adsorbato
- Esta región tiene un gradiente de concentración y se denomina Zona de Transferencia de masa o zona de Adsorción.

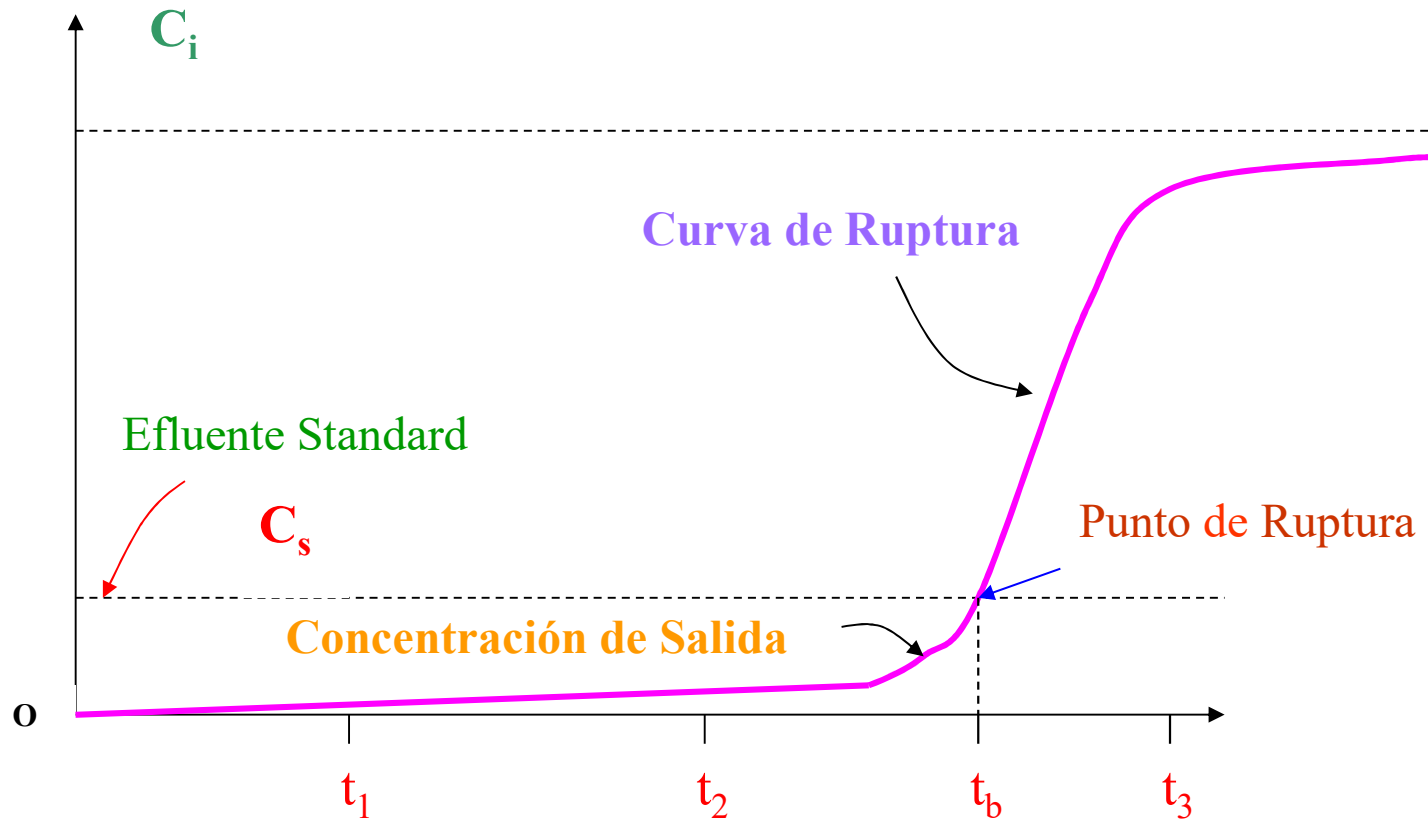


# Dinámica de la Adsorción

❖ A medida que transcurre el tiempo, la zona de adsorción se mueve más adentro del lecho y eventualmente se aproxima a la salida



# Curva de Ruptura



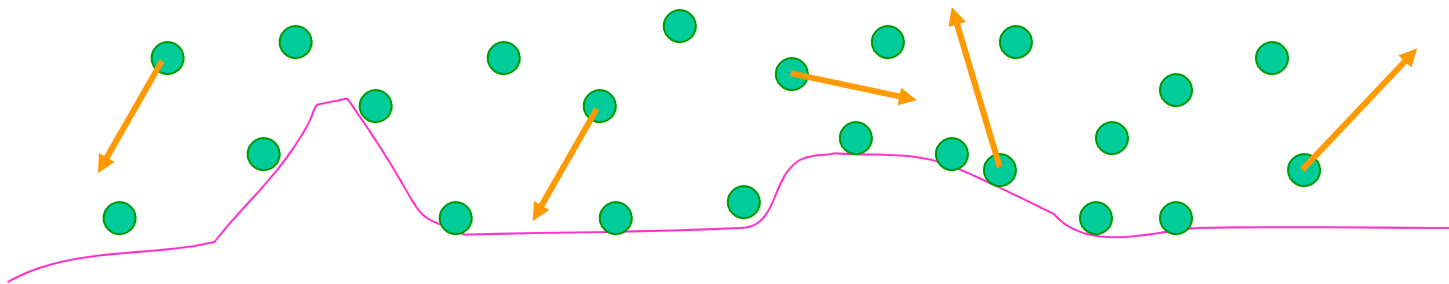
**Volumen de Gas a la salida o Tiempo de Operación**

# Curva de Ruptura

- Tiempo de Ruptura (  $t_b$  )
- Capacidad hasta la Ruptura

## Equilibrio de Adsorción

La adsorción implica retención y el lanzamiento simultáneos de las moléculas del gas

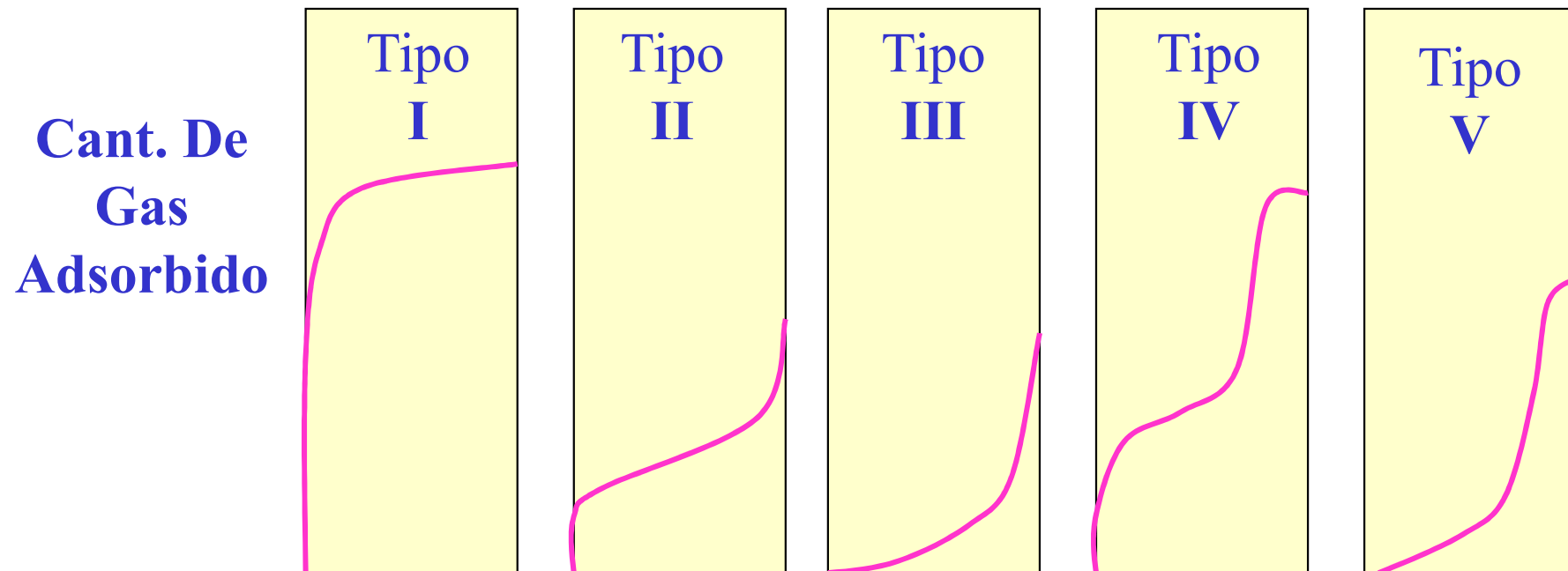


# Isotermas de Adsorción

- ❖ En el Equilibrio las velocidades de Adsorción y Desorción son **Iguales**
- ❖ La cantidad de Adsorbato en el Equilibrio en la Superficie depende de la **Temperatura** y de la **Concentración de la Fase Gaseosa**
- ❖ La Relación de Equilibrio entre la Cantidad de material que se Adsorbe y la cantidad que está en la Fase Gaseosa se conoce como **Isoterma de Adsorción.**
- ❖ La **Isoterma de Adsorción** es una Curva Característica de la Capacidad de Equilibrio de Adsorbato por unidad de masa de Adsorbente vs. Concentración de Adsorbato a **P y T** cte.

# Tipos de Isotermas

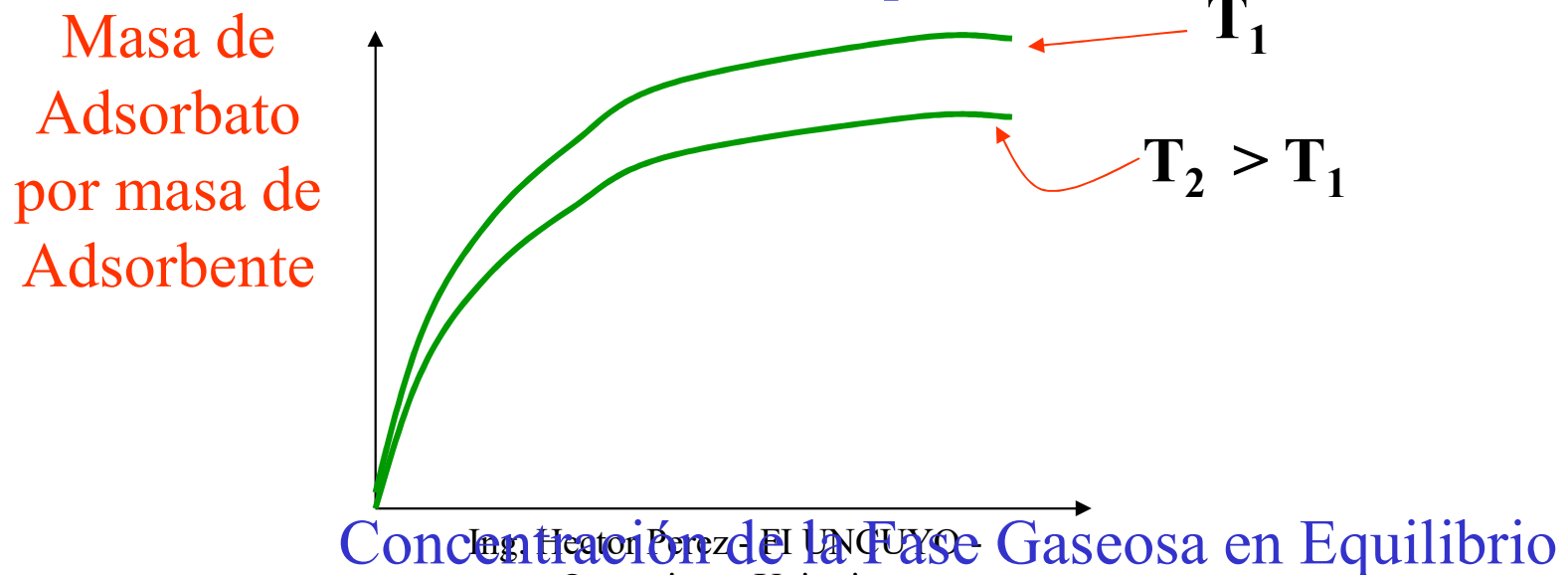
- La **Isoterma de Adsorción** es útil para indicar la **Afinidad** de un Adsorbato por un Adsorbente Particular
- La mayoría de las Isotermas pueden **Caracterizarse por la Forma** como alguna de los **5 Tipos**



**Presión Parcial o Concentración**  
Ing. Hector Pérez - El INCIYO  
Operaciones Unitarias



## Favorable para la Adsorción



# Conclusiones

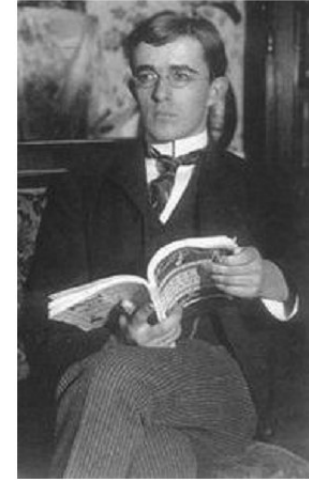
- ❁ Curvas de Adsorción Favorables → gran Adsorción a una Concentración de la Fase Gaseosa en Equilibrio **BAJA**
- ❁ La adsorción es más Efectiva a **Baja Temperatura**
- ❁ La Capacidad de Adsorción puede determinarse por la **Isotherma de Adsorción**
  - ❁ Están en el orden de 0.1 a 0.6 g de Adsorbato por gramo de Adsorbente.
  - ❁ En la Práctica la C.A. está en un 30 a 40% de aquellas indicadas por la Isotherma.
    - ❁ Ancho de la Zona de Adsorción
    - ❁ Calor Desarrollado durante el Proceso
    - ❁ Competición con otras Especies por Centros Activos

# Isotermas

## ▪ Ley de Henry

- Es la Isoterma más simple
- Responde a la ecuación:  $m = k p$
- $m$  = masa adsorbida / masa de adsorbente
- $p$  = presión parcial del adsorbato
- Es una Isoterma Lineal que describe la Adsorción a muy bajas concentraciones ( presiones parciales )

# Isotermas



- **Isoterma de Langmuir**
- Modelo propuesto para representar **Quimisorción**
- Describe la dependencia de la Superficie Cubierta con la Presión o Concentración del Fluido sobre la Superficie a una temperatura **Fija**.
- Asume las sig. Simplificaciones:
  - La superficie se cubre con una **monocapa**
  - Un **único gas** está siendo Adsorbido
  - Toda la superficie es **igualmente** Activa para la Adsorción

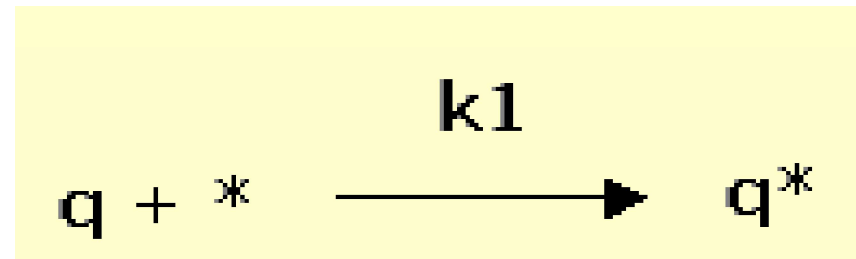
# Isotermas - Isoterma de Langmuir

- Entre el Gas libre y el Adsorbido existe un Equilibrio Dinámico

- Si decimos que:

$q$  = molécula     $*$  = sitio de Adsorción     $q^*$  = molécula adsorbida

Tenemos para la Adsorción:

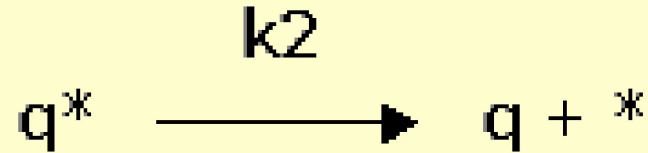


- Siendo la velocidad de Adsorción:

$$r_{ads} = k_1 [q] [*]$$

# Isotermas - Isooterma de Langmuir

- Para la Desorción:



- Siendo la velocidad de Desorción

$$r_{des} = k_2 [q^*]$$

- En el Equilibrio:

$$r_{ads} = r_{des} = k_1 [q] [*] = k_2 [q^*] \rightarrow \frac{[*]}{[q^*]} = \frac{k_2}{k_1 [q]} = \frac{1}{K[q]}$$

# Isotermas - Isooterma de Langmuir

- Siendo :

$$\left(K = \frac{k_1}{k_2}\right)$$

- El N° total de sitios de Adsorción será:

$$q^{sat} = [q^*] + [*]$$

- Si definimos como Factor de Carga o de Recubrimiento o Capacidad de Adsorción a:

$$\theta_q = \frac{[q^*]}{q^{sat}} = \frac{[q^*]}{[q^*] + [*]} = \frac{1}{1 + \frac{[*]}{[q^*]}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K[q]}} = \frac{K[q]}{K[q] + 1}$$

# Isotermas - Isooterma de Langmuir

- Aplicando la Ley de los Gases Ideales al sistema Gas - Sólido :

$$pV = nRT \rightarrow \frac{n}{V} = \frac{P}{RT} \rightarrow C = \frac{P}{RT} \rightarrow C_g = \frac{P_g}{RT}$$

- Donde C es Concentración
- Y Combinando las Ec. Anteriores obtenemos la Ec. de Langmuir.

$$\theta_g = \frac{q^*}{q^{sat}} = \frac{K_g P_g}{1 + K_g P_g} \rightarrow q^* = q_{sat} \left( \frac{K_g P_g}{1 + K_g P_g} \right)$$



# Isotermas - Isooterma de Langmuir

- Conclusiones

$\theta \rightarrow KP$  a bajas Presiones

$\theta \rightarrow 1$  a altas Presiones

- Cuando :

$$K_p P_g \rightarrow 0$$

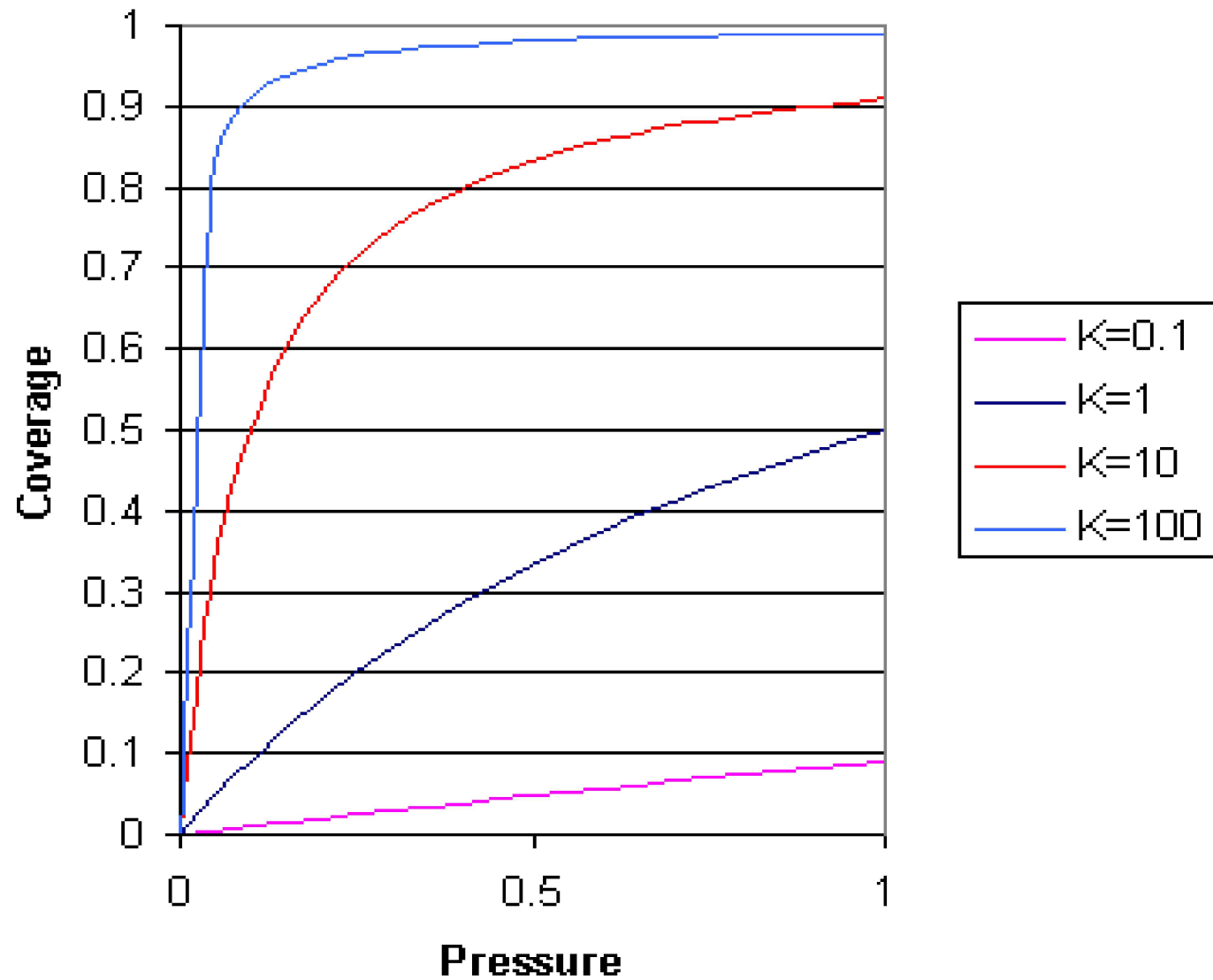
- Hay una relación Lineal entre la Presión y la superficie Cubierta esto es la **Ley de Henry**

- Cuando :

$$K_p P_g \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{q}{q_{sat}} \rightarrow 1$$

- La Superficie estará completamente Cubierta

# Langmuir Adsorption Isotherm



- Cuando :

$$K_g P_g \rightarrow 1 \Rightarrow \frac{q}{q_{sat}} \approx K_g P_g^m$$

- ( $m < 1$ ), es conocida como Isoterma de Freundlich.

### Otra forma de expresión de la Isoterma es

- $x$  = Cant. de Solute Adsorbido ( $\mu\text{g}$ ,  $\text{mg}$  ó  $\text{g}$ )

- $m$  = masa de adsorbente

- $C$  = concentración de soluto que queda en solución después de la adsorción se ha completado

- $K$ ,  $n$  = Constantes que deben ser determinadas para cada soluto, tipo de adsorbente y temperatura

$$\frac{x}{m} = KC^{\frac{1}{n}}$$

**Freundlich adsorption Isotherm constants for toxic organic compounds† (Dobbs and Cohen 1980)**

Compound	$K(\text{mg/g})(\text{L/mg})^{1/n}$	$1/n$
PCB	14,100	1.03
Bis(2-ethylhexyl phthalate	11,300	1.5
Heptachlor	9,320	0.92
Heptachlor epoxide	2,120	0.75
Butylbenzyl phthalate	1,520	1.26
Toxaphene	950	0.74
Endosulfan sulfate	686	0.81
Endrin	666	0.80
Fluoranthene	664	0.61
Aldrin	651	0.92
PCB-1232	630	0.73
∑ - Endosulfan	615	0.83
Dieldrin	606	0.51

## Desventajas del Modelo de Langmuir

- ⌘ NO todos los Sitios de Adsorción son igualmente Activos
- ⌘ La influencia de moléculas adsorbidas no se tiene en cuenta
- ⌘ Grandes moléculas pueden ocupar más de un Sitio de Adsorción.
- ⌘ Asumir que una molécula Adsorbida es la misma que una en fase Gaseosa.
- ⌘ Asumir que la capa Adsorbida tiene una Molécula de espesor

# Reglas de Adsorción (Carbón Activado FL)

⌘ Grandes moléculas se adsorben mejor que las pequeñas.

⌘ Moléculas no polares se adsorben mejor.

⌘ Insolubles o ligeramente solubles se adsorben mejor.

⌘ La temperatura aumenta la velocidad de difusión a través del líquido hacia los sitios de adsorción pero reduce el grado de adsorción.

# Reglas de Adsorción (Carbón Activado FL)

- ⌘ Alcohol se adsorbe pobremente (polar y soluble).
- ⌘ Aldehidos son altamente polares,  $\uparrow$  PM,  $\downarrow$  Polaridad  $\Rightarrow$  Aumenta la Adsorción
- ⌘ Aminas estructura similar al  $\text{NH}_3$ . Adsorción limitada por polaridad y solubilidad.
- ⌘ Clorados aromáticos y clorados alifáticos son compuestos de baja polaridad y de solubilidad baja, que los hacen generalmente muy adsorbibles.