



Tema 6. Adsorción

Curso 2011-12

*Ampliación de procesos industriales
de separación*

Ampliación de Procesos Industriales de Separación, 2012-2013 Joaquín Coronas-Víctor Sebastián

Bibliografía

- ➔ McCabe, W.L., J.C. Smith, P. Harriott, *Unit operations of chemical engineering*, Ed. McGraw-Hill, New York (2001).
Capítulo 25. Fixed-bed separations.
- ➔ Rouquerol, F., J. Rouquerol, K. Sing, *Adsorption by powders and porous solids*, Ed. Academic Press, San Diego (1999).
Capítulo 1. Introduction.
- ➔ Ruthven, D.M., *Principles of adsorption and adsorption processes*, Ed. John Wiley & Sons, New York (1984).
Capítulo 1. Microporous adsorbents.
Capítulo 2. Physical adsorption and the characterization of porous adsorbents.
- ➔ Seader, J.D., Henley, E.J., *Separation process principles*, Ed. John Wiley & Sons Inc., New York (2006).
Capítulo 15. Adsorption, ion exchange and chromatography.
- ➔ Wankat, P.C., *Rate-controlled separations*, Ed. Blackie Academic & Professional, Glasgow (1994).
Capítulo 6. Basics of sorption in packed columns.
Capítulo 8. Non-linear theories and packed bed adsorption systems.
- ➔ Yang, R.T., *Gas separation by adsorption processes*, Ed. Imperial College Press, Singapore (1997).
Capítulo 2. Adsorbents and adsorption isotherms.

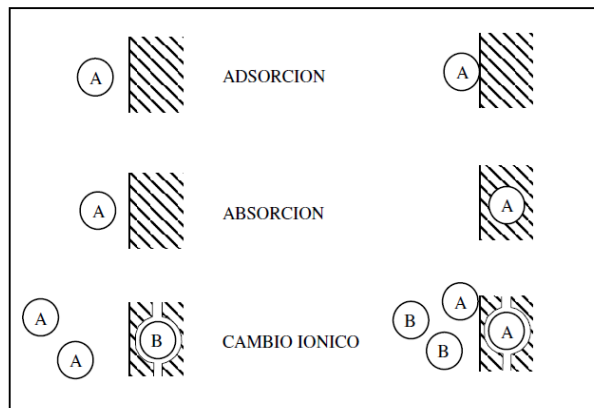
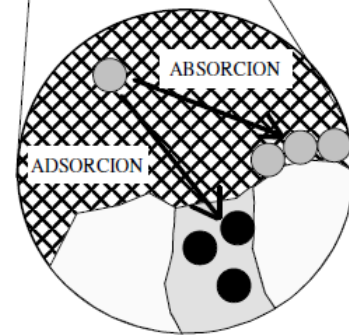
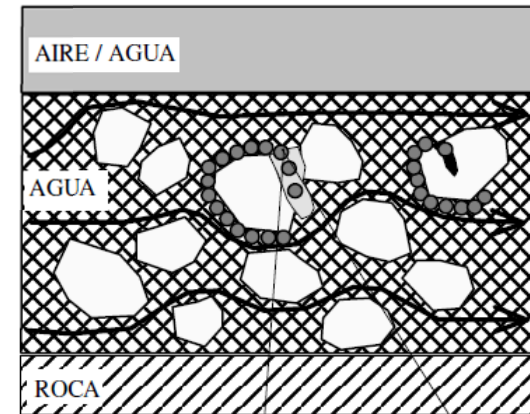
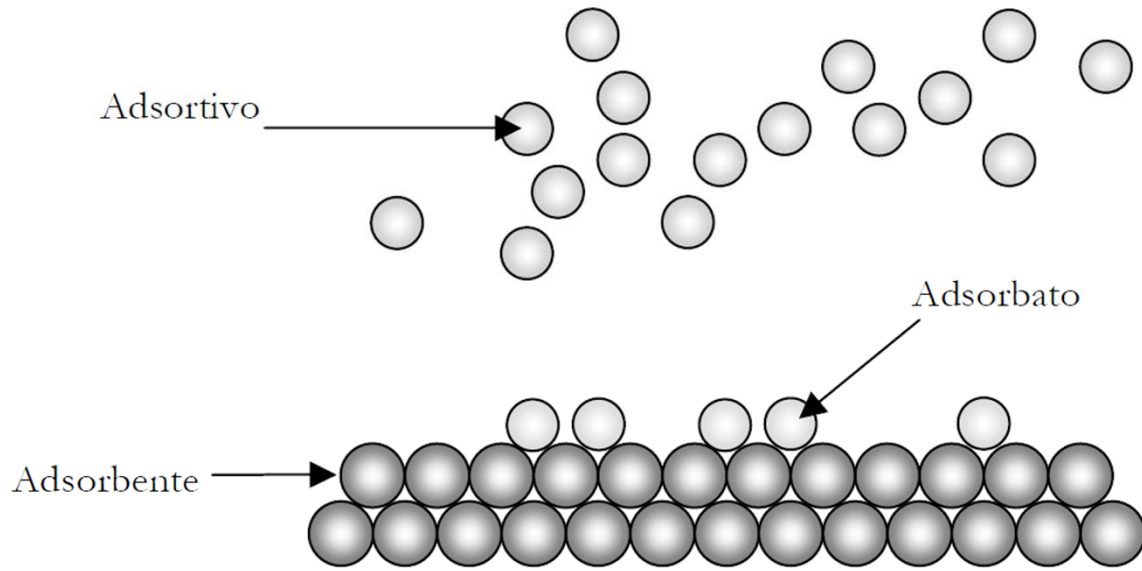
Índice

- Adsorción. Generalidades
- Tipos de adsorbentes
- Ecuaciones de isotermas
- Operaciones de adsorción
- Adsorción en lecho fijo

- **Adsorción. Generalidades**
 - ✓ Definiciones y terminología
 - ✓ Fisisorción y quimisorción
 - ✓ Tipos de isotermas de adsorción
 - ✓ Adsorción por carbones activos
 - ✓ Adsorción por óxidos metálicos
 - ✓ Adsorción por zeolitas

Adsorción: definiciones

- **Adsorción:** enriquecimiento de uno o más componentes en una interfase sólido-fluido. A veces la adsorción se sigue de **absorción**
- **Adsorbato:** sustancia en el estado adsorbido
- **Adsorbible/adsortivo:** sustancia en la fase fluida
- **Adsorbente:** material sólido sobre el que se produce la adsorción
- **Quimisorción:** adsorción en la que se producen enlaces químicos
- **Fisorción:** adsorción sin enlaces químicos
- **Capacidad de una monocapa:** la cantidad quimisorbida para ocupar todos los centros superficiales, o fisorbida para cubrir toda la superficie
- **Ocupación superficial:** relación entre la cantidad de sustancia adsorbida y la capacidad de una monocapa
- **Área superficial:** extensión de la superficie disponible tal y como se determina por cierto método en unas condiciones dadas
- **Área superficial específica:** área superficial por unidad de masa de polvo
- **Superficie externa:** área de la superficies externa de las partículas, teniendo en cuenta las cavidades más anchas que profundas, pero no la porosidad



Diferentes procesos de sorción (Appelo and Postma, 1993)

Aplicaciones del Carbón Activo

Fase Líquida

- Tratamiento de agua potable y residual
- Alimentos y bebidas carbonatadas
- Hidrometalurgia
- Productos químicos y farmacéuticos



Fase Gaseosa

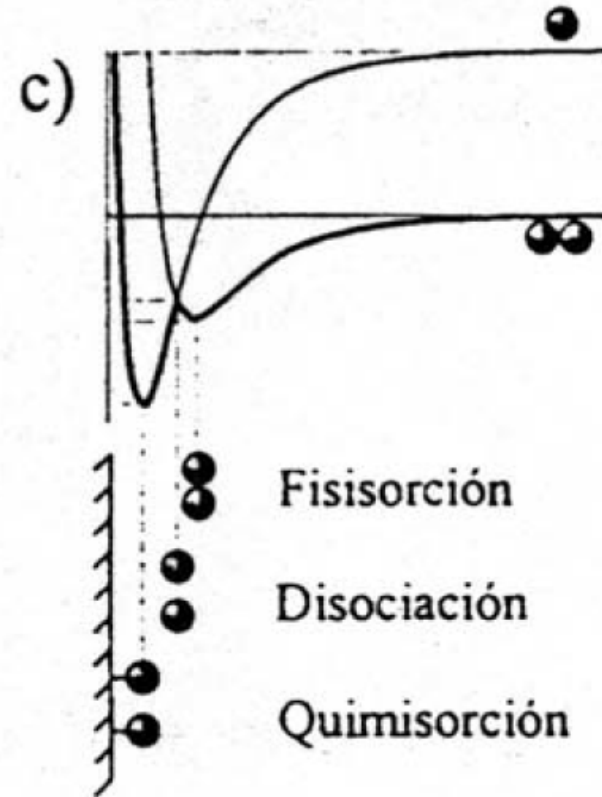
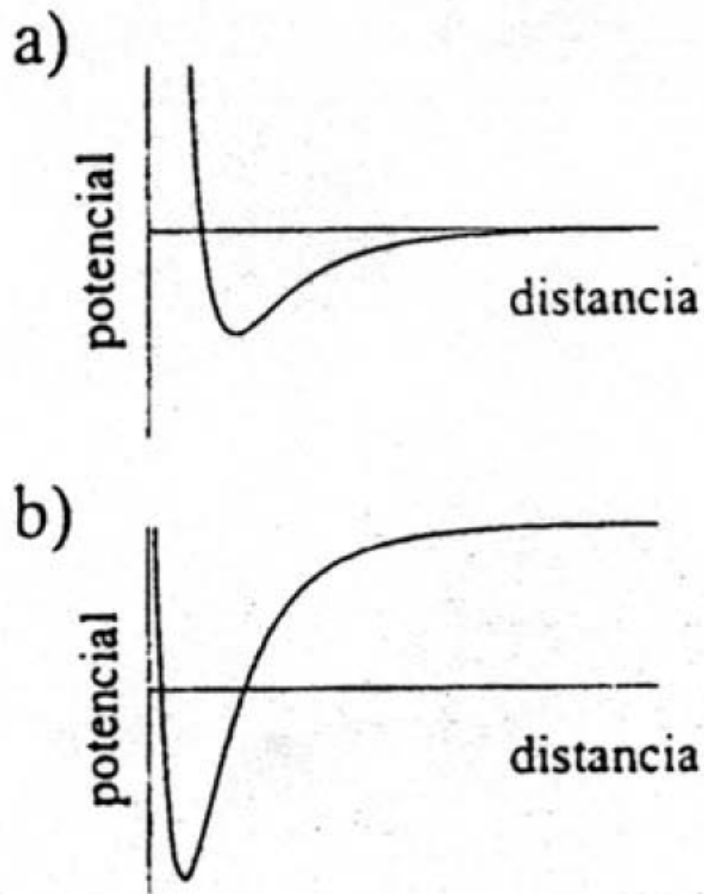
- Purificación de gases
- Purificación de aire
- Recuperación de solventes
- Catalizadores
- Producción de gases
- Tratamiento de gases de combustión
- Celdas combustibles

Fisisorción y quimisorción

- Las fuerzas para la **fisisorción** son las mismas que las responsables de la **condensación** de un vapor.
- Las interacciones de la **quimisorción** son en esencia las responsables de la formación de un **enlace químico**

En la fisisorción aparecen tanto las **fuerzas de van der Waals** (siempre) como las **interacciones electrostáticas**

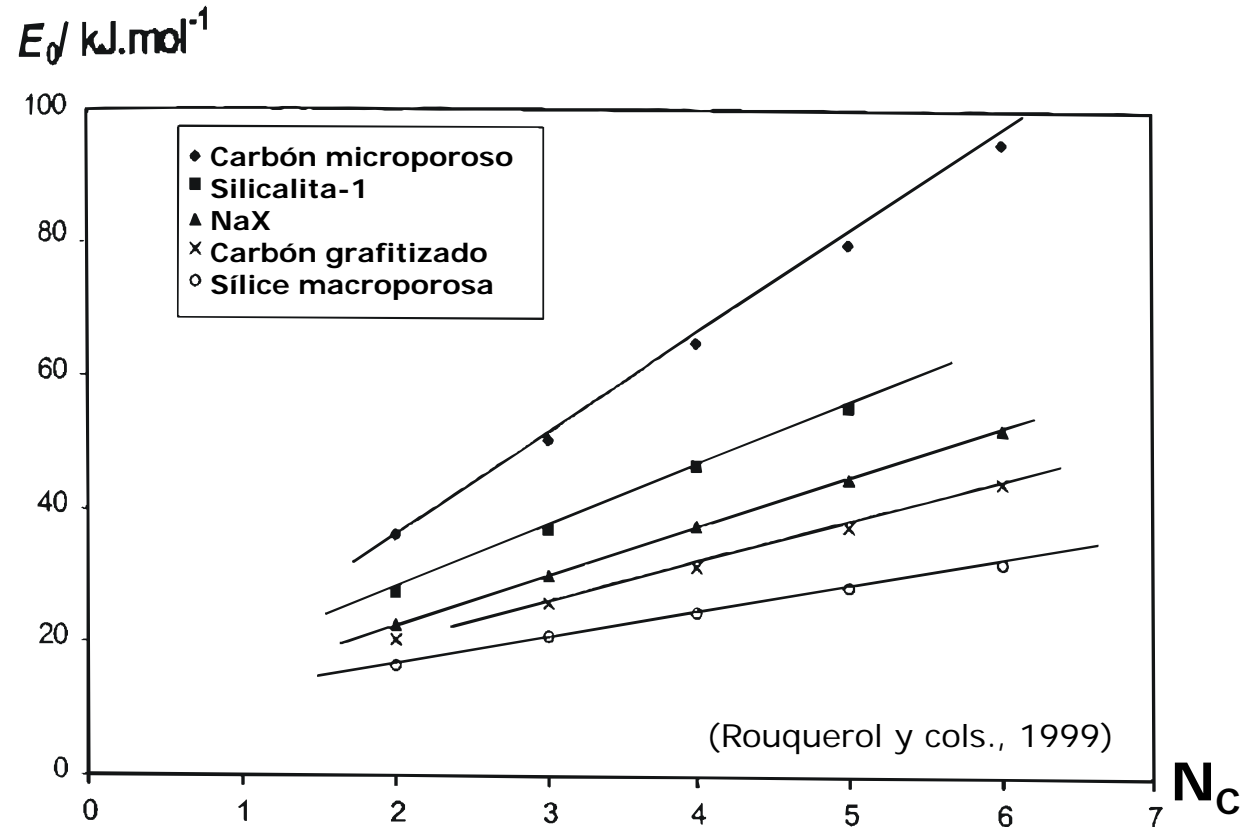
Las electrostáticas son muy importantes en el caso de la adsorción (**específica**) de pequeñas moléculas dipolares (H_2O , NH_3) sobre adsorbentes con estructura iónica (zeolitas). El calor de adsorción en este caso es 25-30 kcal/mol, comparable al de la quimisorción



Esquema de la evolución de la energía potencial de una molécula de gas acercándose a una superficie plana. a) Fisisorción. b) fisisorción de una molécula disociada, c) fisisorción seguida de quimisorción.

Adsorción Física	
Calor de adsorción pequeño (< 2-3 veces el calor latente de evaporación)	
No específica (en principio)	
En mono o multicapa (Pr↑)	
No hay disociación de las especies adsorbidas	
Significativa sólo a bajas temperaturas . Rápida, no activada, reversible	
Sin transferencia de electrones , aunque se puede polarizar el adsorbato	

Energética de la fisisorción



Aumento de la adsorción cuando las moléculas tienen que entrar en **poros de dimensiones moleculares**

Materiales porosos

- ✓ Cualquier material que contenga cavidades, canales o intersticios puede ser considerado como poroso.
- ✓ Clasificación de los poros de acuerdo a su disponibilidad a un fluido externo:
 - *Poros cerrados*: totalmente aislados de sus vecinos. Influyen en propiedades macroscópicas como la densidad, fortaleza mecánica y conductividad térmica, pero son inactivos en procesos como flujo de fluidos y adsorción de gases.
 - *Poros abiertos*: poseen canales continuos de comunicación con la superficie externa del material.

- ✓ Las geometrías más frecuentes de los poros son:
 - *Poros cilíndricos* (por ejemplo, en alúmina y óxido de magnesio).
 - *Poros en forma de rendija o hendidura* (en carbones activados y arcillas).
 - *Espacios o huecos* entre esferas de sólido conectadas (en sílice y otros sólidos obtenidos a partir de geles).
 - *Poros en forma de bote de tinta* (ink-bottle shaped): el cuerpo del poro es mayor que su boca).
 - *Poros en forma de embudo* (funnel shaped): contrario al anterior.

- ✓ La IUPAC reconoce tres tipos de poros atendiendo a su tamaño:
 - Macroporos* → > 50 nm
 - Mesoporos* → 2 - 50 nm
 - Microporos* → 2 nm

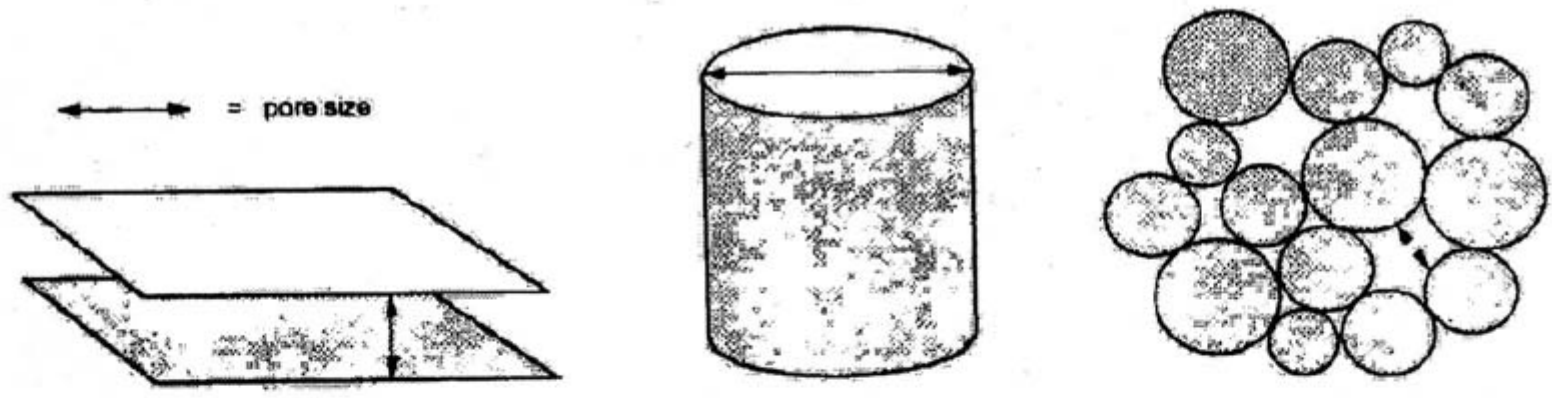


Fig. 1. Common models of pores.

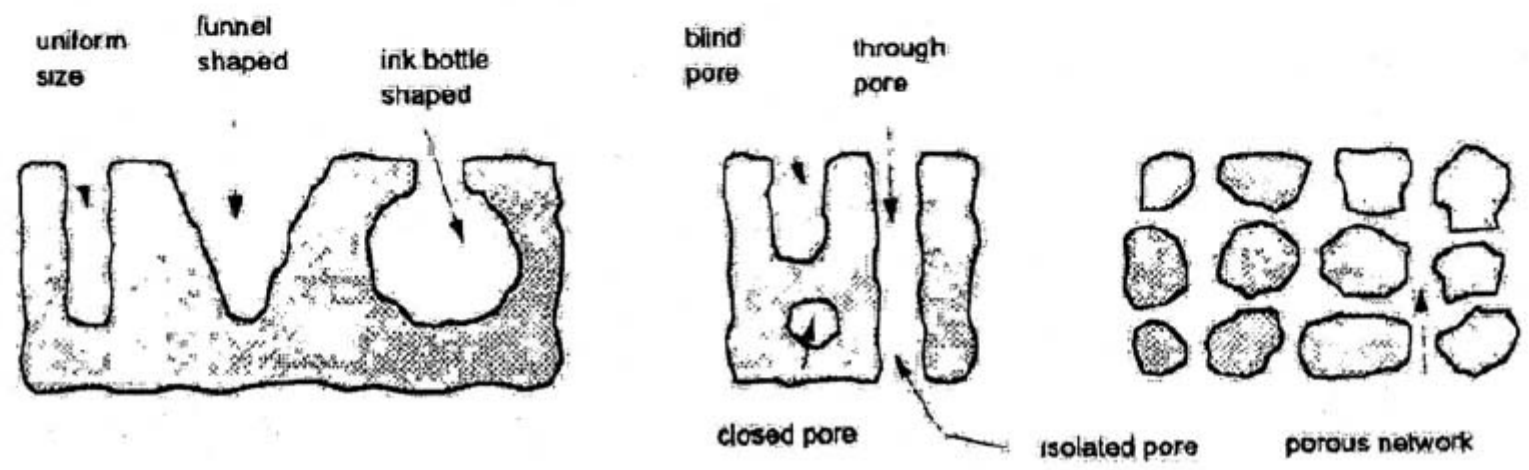


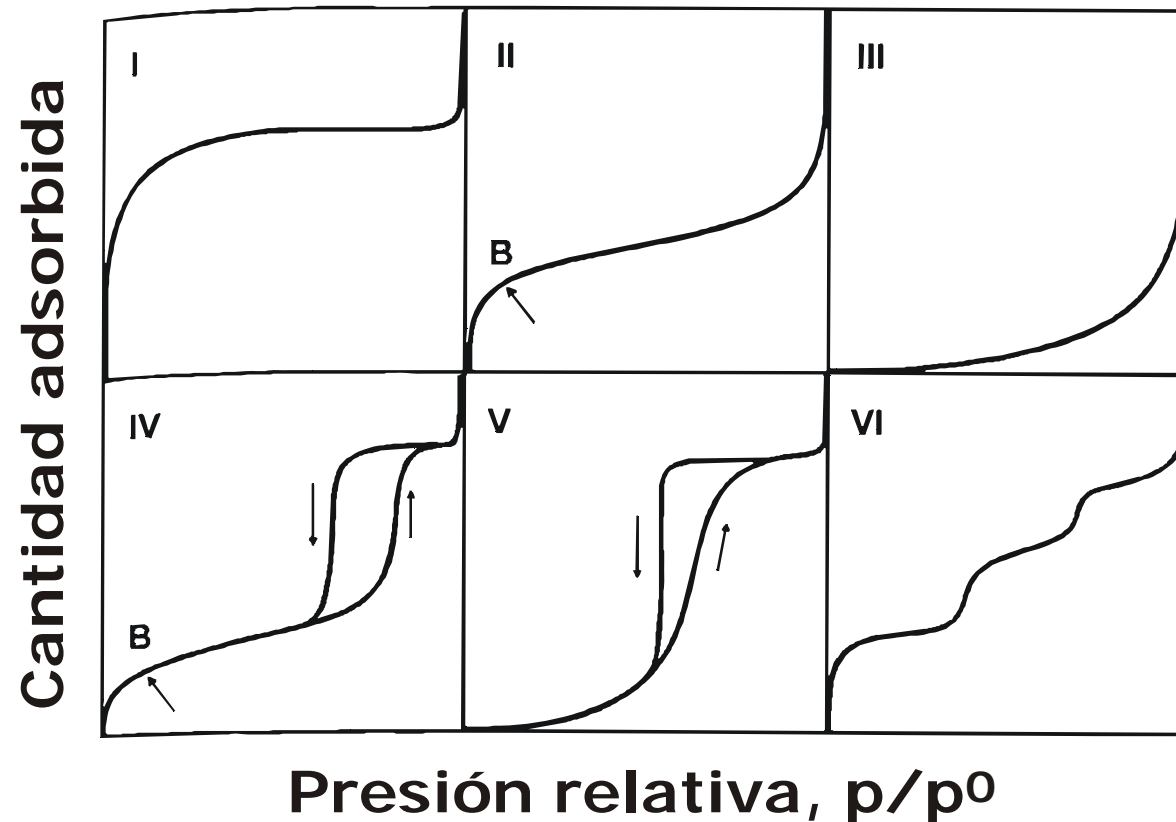
Fig. 2. Types of pores.

Isotermas de adsorción

- **Se definen** como la relación entre la cantidad adsorbida por unidad de masa de sólido y la presión de equilibrio (o presión relativa) a una temperatura dada
- Pueden **dar una idea de cómo es la estructura** porosa de un cierto sólido
- La **IUPAC** (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) establece 6 tipos distintos de isotermas para la adsorción física

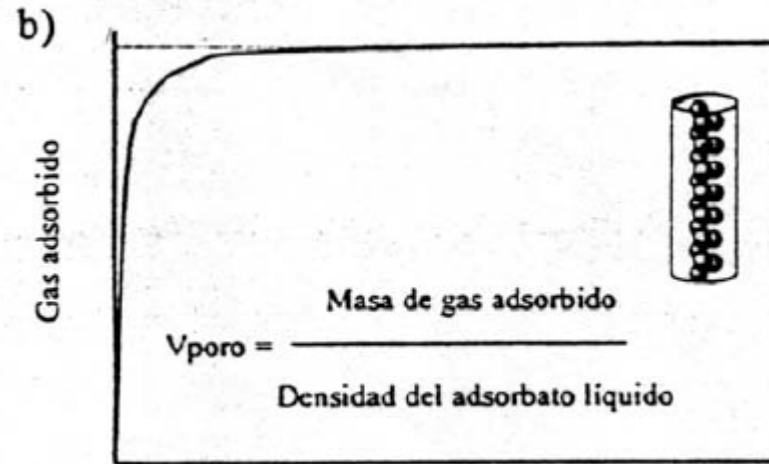
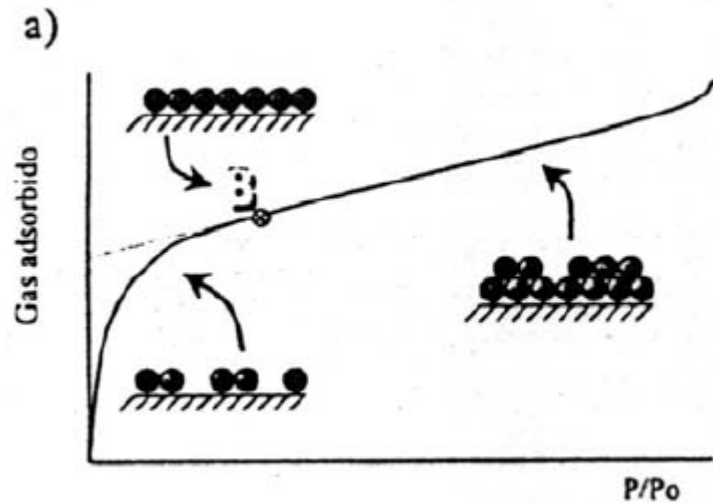
Tipos de isoterms (IUPAC)

- Se trata de una **clasificación necesariamente simplificada**, puesto que muchas isoterms reales son combinación de otras básicas
- Incluso hay isoterms que **no son monotónicas** (y pasan por máximos)



Información que se obtiene

- **Tipo I.** Para adsorbentes microporosos, en los que la saturación queda limitada por el llenado de los microporos. Común
- **Tipo II.** El punto B indica que se ha completado una monocapa, a partir de la que se superponen otras. Común
- **Tipo III.** Indica una débil interacción adsorbato-adsorbente. Rara
- **Tipo IV.** Su región inicial se parece a la de la tipo II. La histéresis está relacionada con el llenado y vaciado de los mesoporos por condensación capilar. Común
- **Tipo V.** Como la III, indica una débil interacción adsorbato-adsorbente. Tiene también histéresis. Rara
- **Tipo VI.** Se asocia con la adsorción capa a capa sobre superficies muy uniformes. Rara



a) Isoterma en la que se muestran la zona de llenado de la monocapa, la multicapa y el punto B; y b) Isoterma tipo I en la que se señala cómo calcular el volumen de poro a partir de la cantidad máxima de gas adsorbido

Tipos ciclos de histéresis:

- *Tipo A*. Característica de capilares de forma tubular abiertos en ambos extremos, y de capilares con forma de bote de tinta.

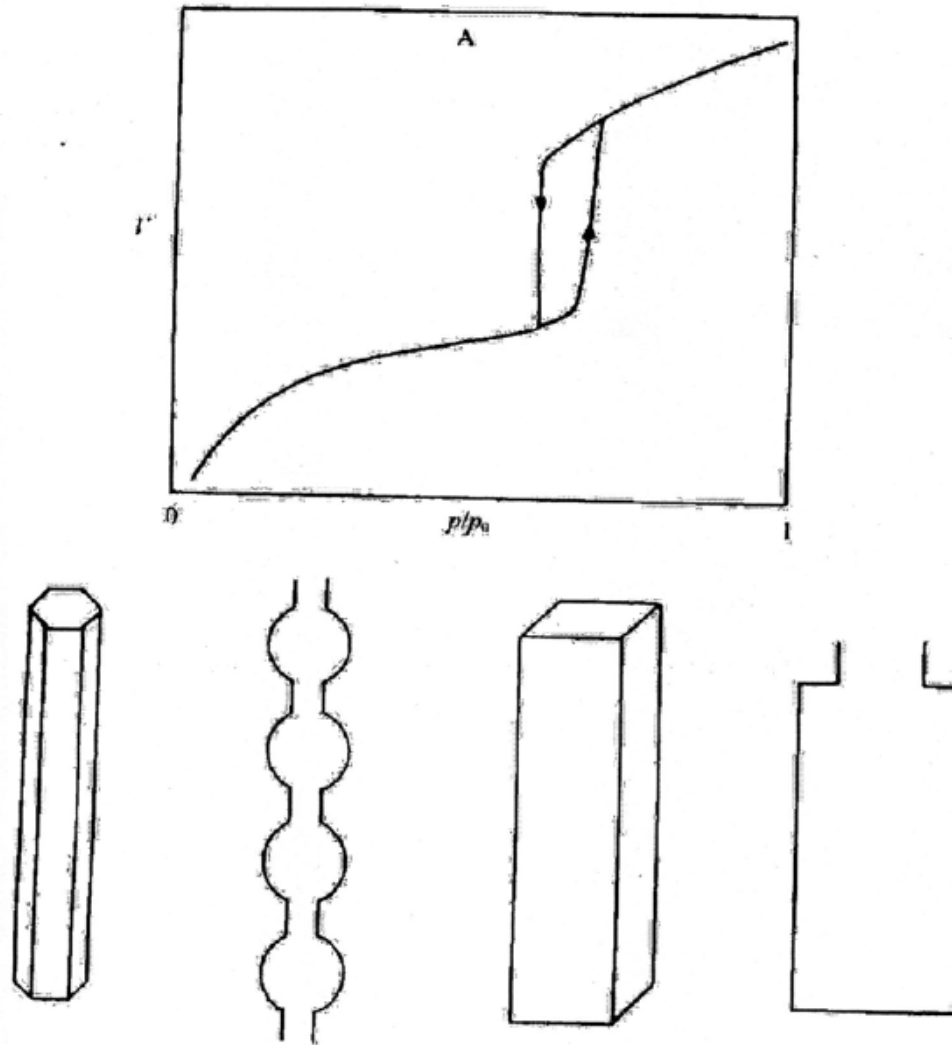
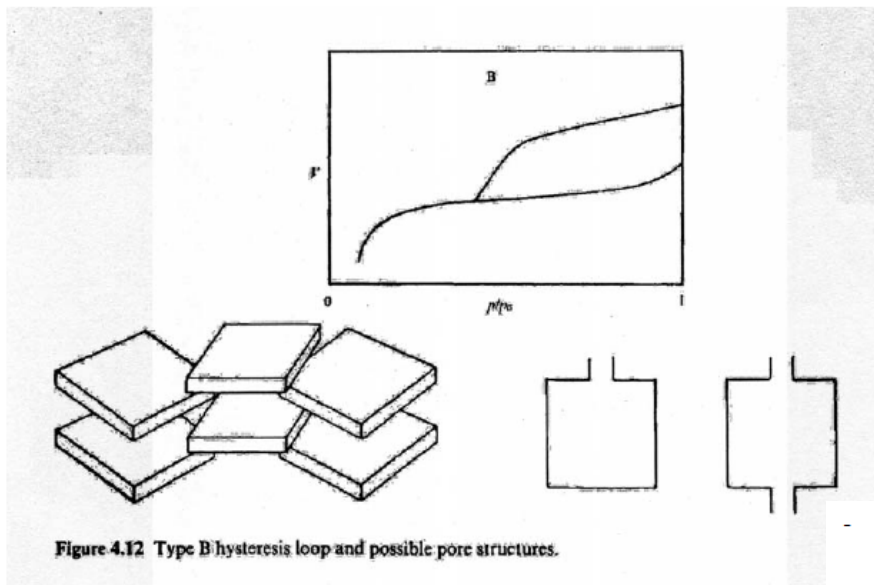
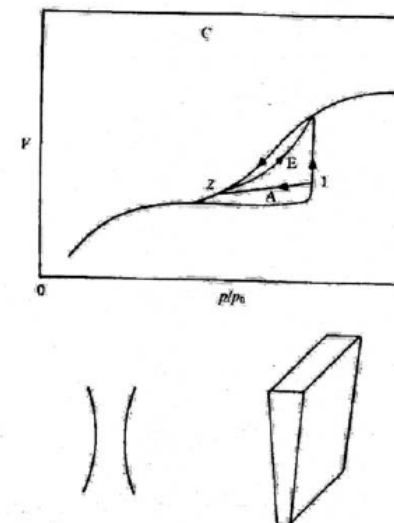


Figure 4.11 Type A hysteresis loop and possible pore structures.

- **Tipo B.** Característica de poros formados por dos láminas paralelas. Este tipo de histéresis ocurre en el grafito, montmorillonitas e hidróxidos de aluminio.

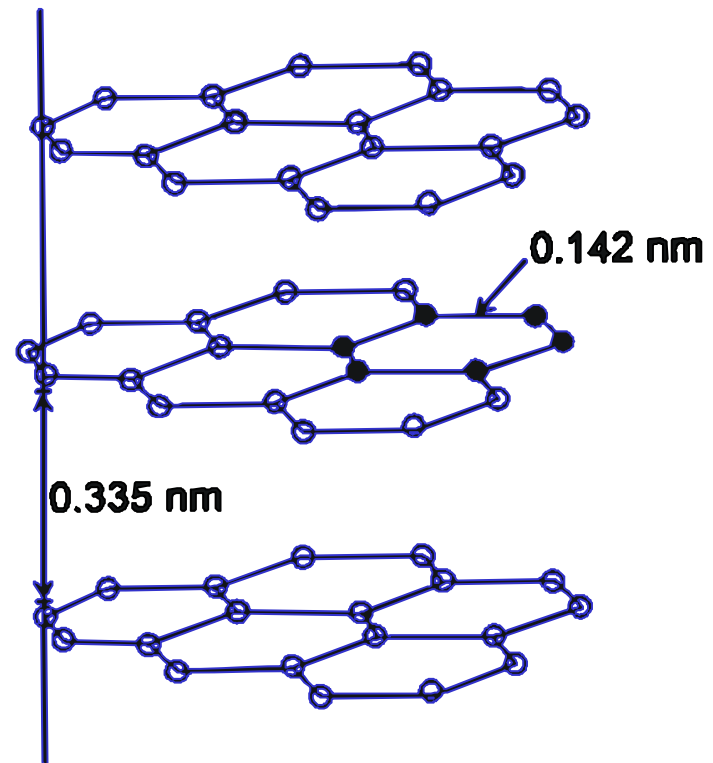


- **Tipo C.** Característica de materiales con poros esferoidales todos con un radio de la cavidad circular pero con entradas de varios tamaños.

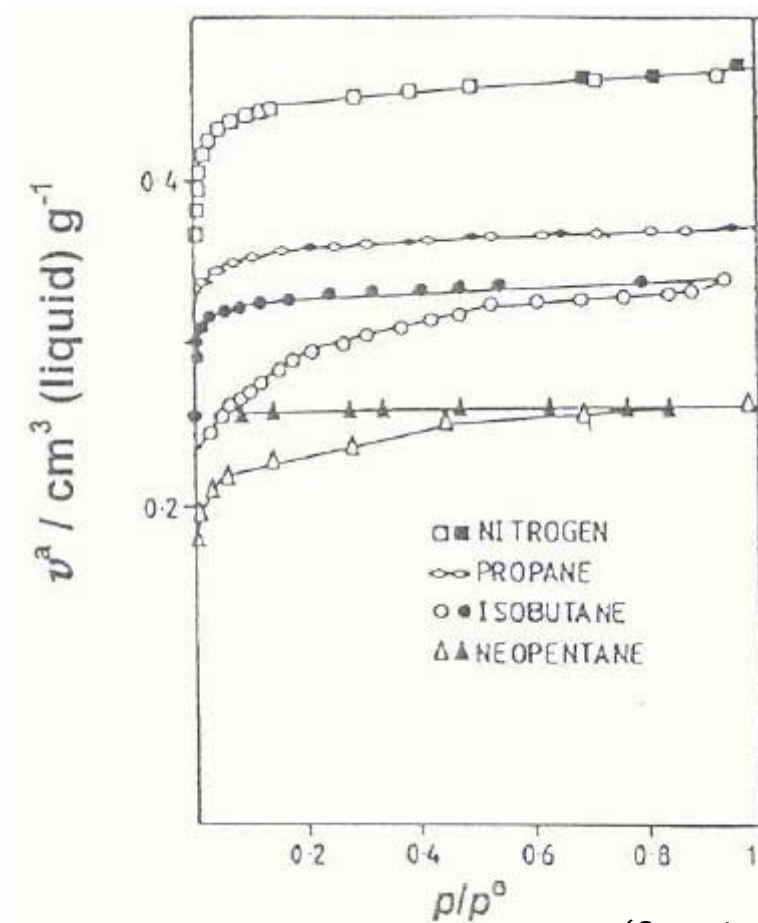


Carbones activos

- **Material carbonoso** con elevada área superficial específica
- **Estructura amorfa** compleja compuesta de microcristalitas de grafito empaquetadas al azar dejando espacios microporosos
- Superficie específica: **5-3000 m²/g**
- Diámetro de poro: **0,4-4,0 nm**

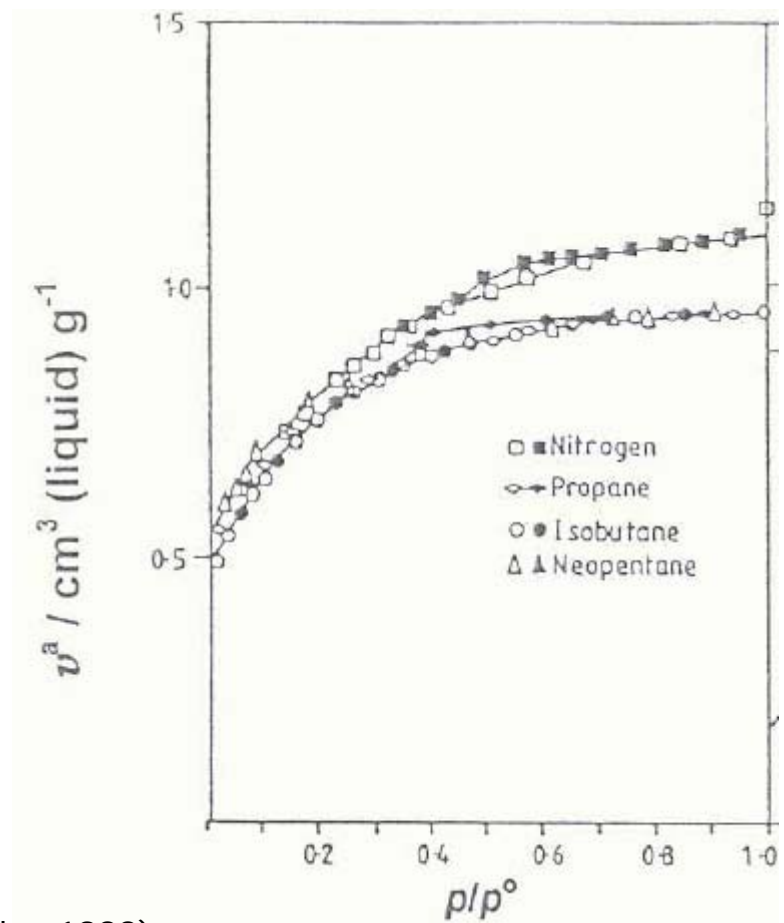


- Se preparan por **descomposición térmica** de materiales carbonosos (cáscaras de coco, almendras, etc.; madera; huesos de melocotones, olivas; carbón; desechos poliméricos; etc.)
- La **activación** es la eliminación con vapor de agua o CO_2 a temperaturas elevadas (700-1100 °C) de los productos de la carbonización
- La superficie del carbón activo es esencialmente **no polar**, aunque algo se puede lograr oxidando su superficie
- Es esencialmente un material **hidrofóbico y organofílico**
- En general, no muestra selectividad a la adsorción de moléculas de tamaño diferente
- En condiciones especiales de activación se pueden preparar **tamices moleculares de carbón** (0,4-0,9 nm)



(Carrot y cols., 1988)

MSC, $dp = 0,4-0,7 \text{ nm}$



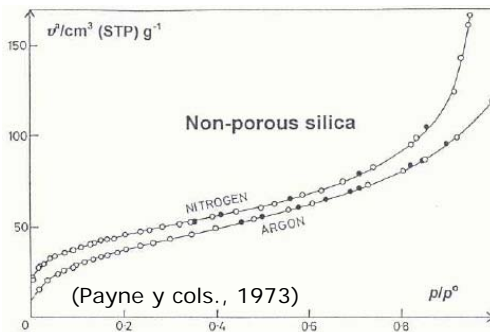
MSC, $dp = 0,4-3 \text{ nm}$

Óxidos metálicos

- Algunos óxidos metálicos (alúmina, sílice, óxido de magnesio) se pueden preparar en un estado estable de **alta área superficial**
- Otros (óxidos de cromo, hierro, níquel, titanio y zinc) dan áreas inferiores, pero muestran **adsorción específica y actividad catalítica**
- Pueden ser **amorfos** (sílice) o **cristalinos** (anatasa, rutilo)
- Experimentan **hidratación y/o hidroxilación** superficial, lo que les confiere propiedades de adsorción específica con muchas moléculas polares

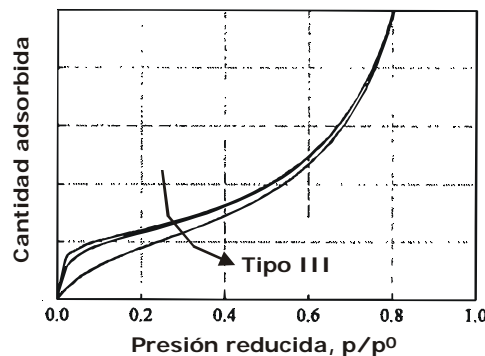
Óxidos metálicos: sílice

- **Sílice pirogénica** o sílice-humo o *aerosil*.
Partículas esféricas de 10-100 nm no porosas



Isoterma tipo II
30-200 m^2/g
Hidrofilicidad debida a los grupos superficiales silanol

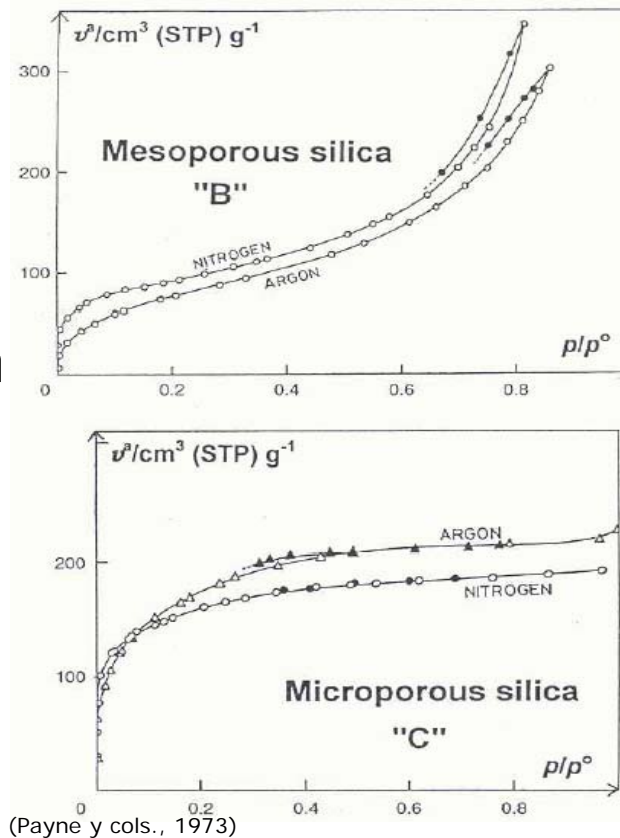
- **Sílice cristalina** o cuarzo no poroso



Material menos hidrofílico
Isoterma entre tipo II y III,
es decir, se reduce la adsorción en multicapa

➤ **Sílice precipitada**, exhibe una isoterma de tipo II (mono/multicapa) y tiene carácter hidrofílico

➤ **Gel de sílice** se prepara por deshidratación de hidrogeles producidos al reaccionar silicato de sodio con un ácido



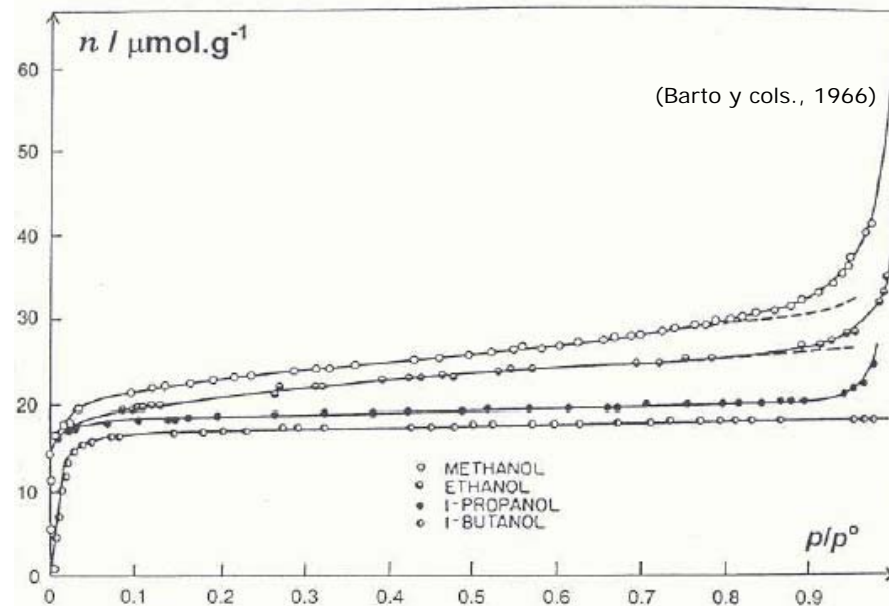
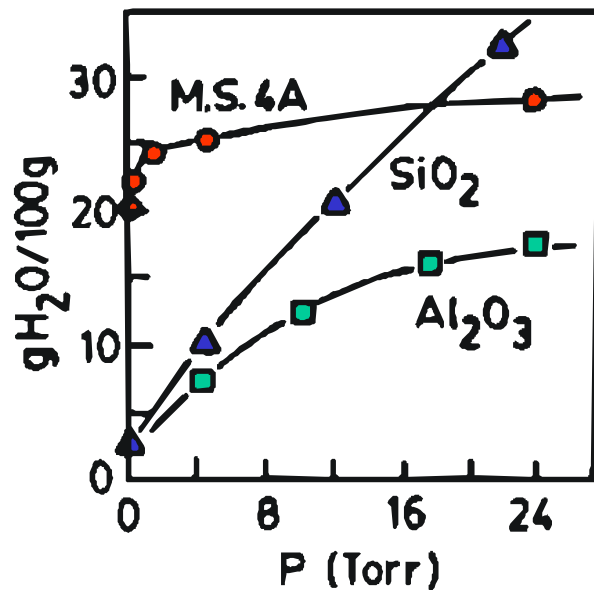
Gel de sílice mesoporoso: isoterma tipo II con algo de histéresis (330 m^2/g)

Gel de sílice microporoso: isoterma tipo I (590 m^2/g)

Óxidos metálicos: alúmina

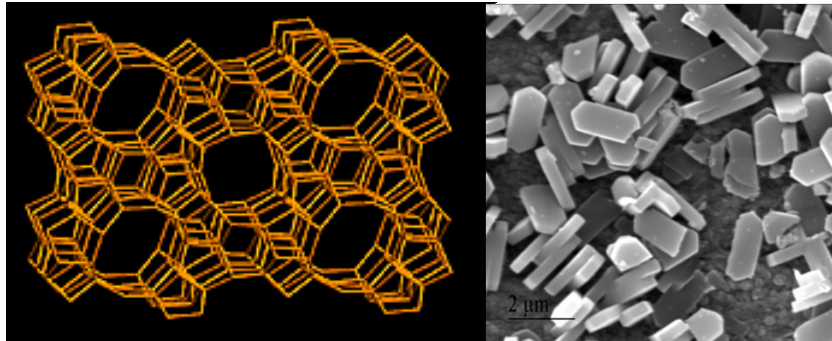
- El término **alúmina activada** se aplica a un adsorbente preparado por tratamiento térmico de alguna forma de alúmina hidratada ($\text{Al}(\text{OH})_3$, AlOOH). Desecante, recuperación de vapores
- Se pueden considerar **dos estructuras**: α -**alúmina**, hecha por tratamiento térmico de gibbsita o boehmita a más de $1200\text{ }^\circ\text{C}$ ($<5\text{ m}^2/\text{g}$), y γ -**alúmina**, más reactiva, que no existe en la naturaleza, preparada a temperaturas intermedias y que puede evolucionar irreversiblemente a α -alúmina a alta temperatura ($300\text{-}400\text{ m}^2/\text{g}$; mesoporos, $3,6\text{-}6\text{ nm}$; macroporos, $100\text{-}300\text{ nm}$)

➤ **γ -Alúmina** tiene una superficie hidratada más compleja que el gel de sílice donde el agua puede estar coordinada y no se empieza a eliminar **hasta pasados 200 °C**. Esto hace que sea un desecante de alta temperatura

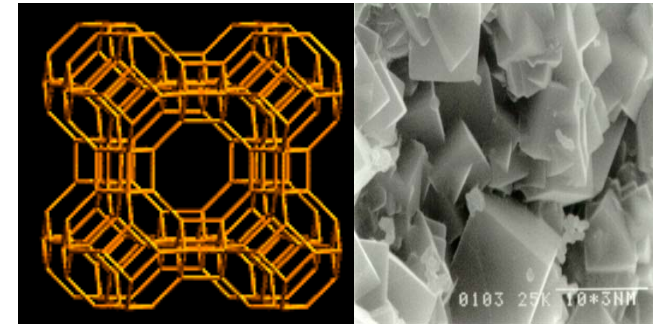


Zeolitas

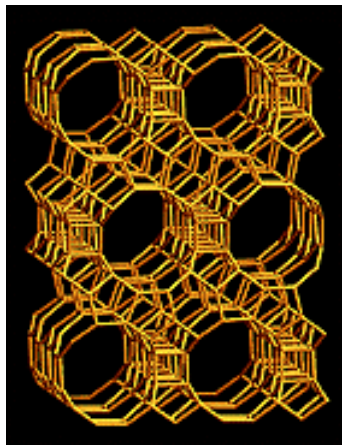
- La unidad básica de las zeolitas es el tetraedro TO_4 , donde T es Si o Al, en el caso de las zeolitas aluminosilicatadas, o P, en el caso de los aluminofosfatos
- **Organofílicas** (como la silicalita-1 o la zeolita beta) e **hidrofílicas** (con las zeolitas A, X e Y o la mordenita); siempre $\text{Si/Al} > 1$
- Diámetro de poro entre 0,3 y 1 nm, 300-600 m^2/g
- 200 estructuras diferentes y unas 300 zeolitas
- Naturales y sintéticas. Pseudozeolitas (AIPOs, SAPOs, titanosilicatos, mesoporosos) vs. Zeolitas clásicas



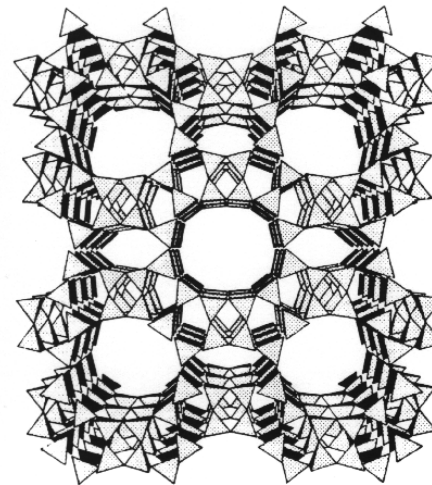
MFI; 0,55 nm



LTA; 0,41 nm

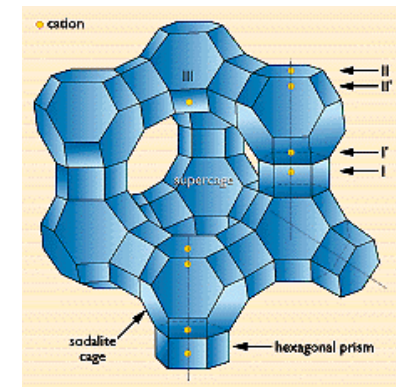


BEA; 0,64 x 0,76 nm

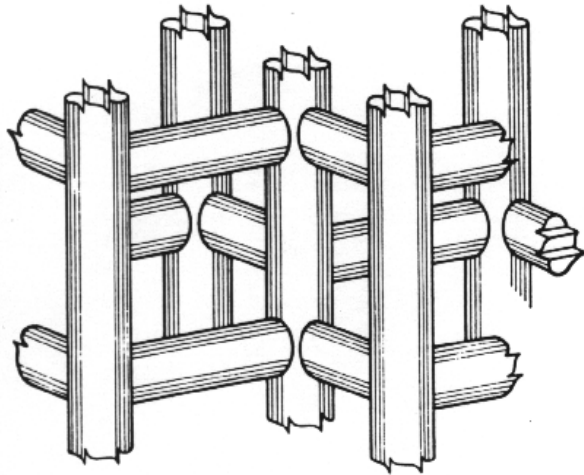


MOR; 0,67 x 0,7 y 0,29 x 0,57 nm

(Barto y cols., 1966)



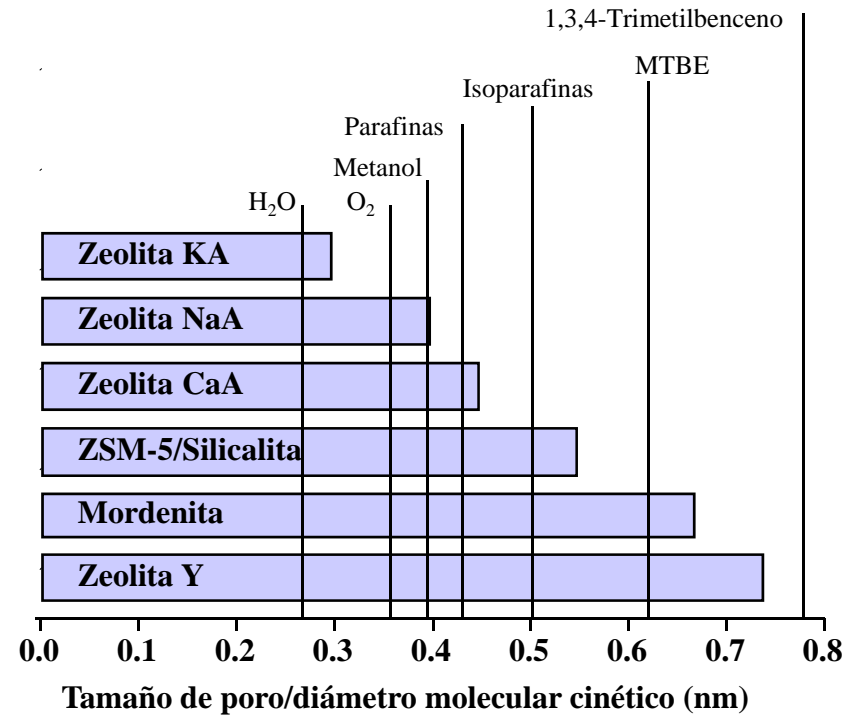
FAU; 0,74 nm



Estructura tipo MFI:

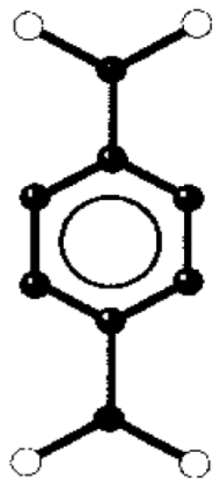
*2 isomorfos: ZSM-5 y silicalita

*canales rectos de 0,53 x 0,56 nm y sinusoidales de 0,51 x 0,56 nm

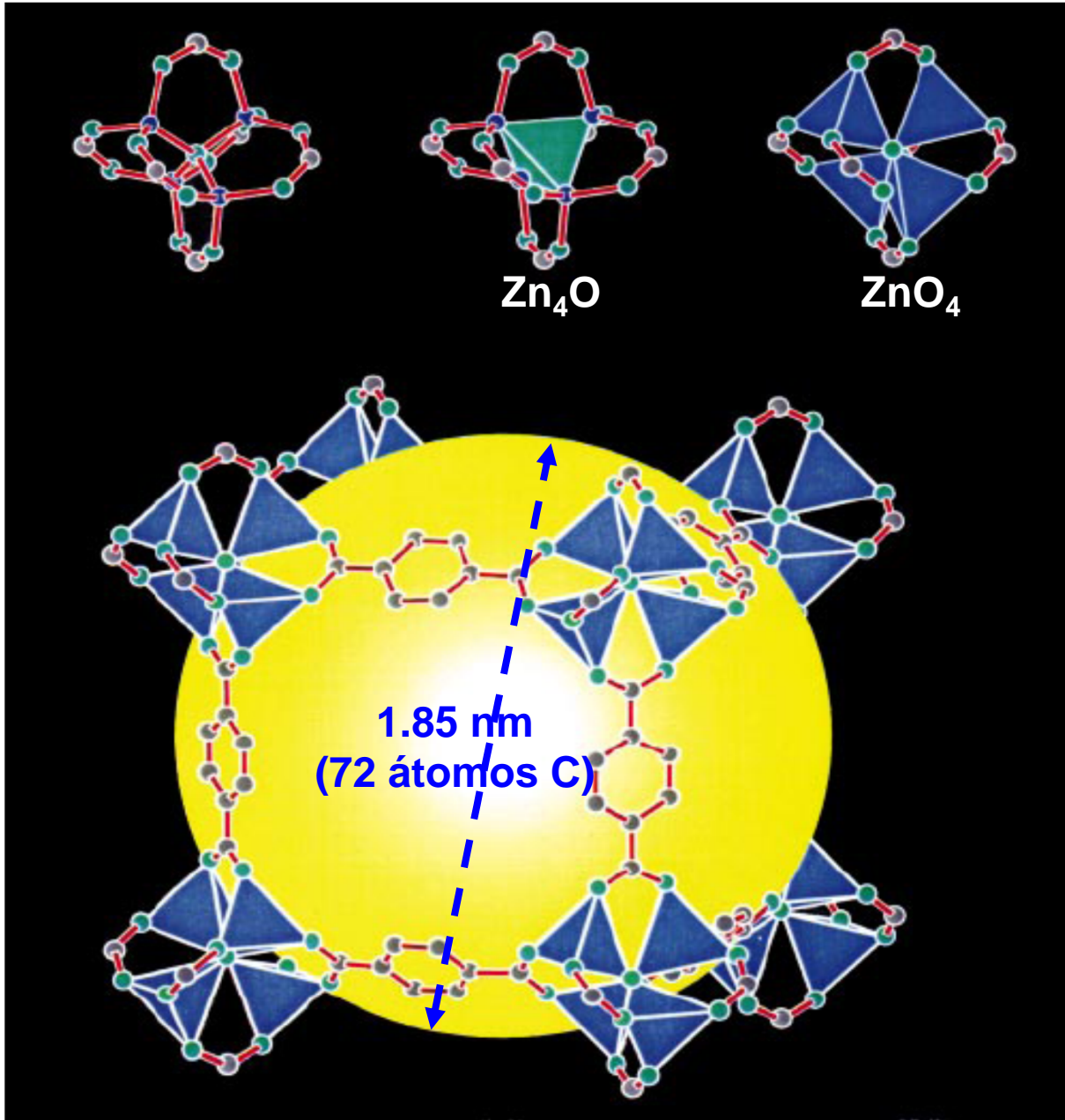


Tamices moleculares a la carta

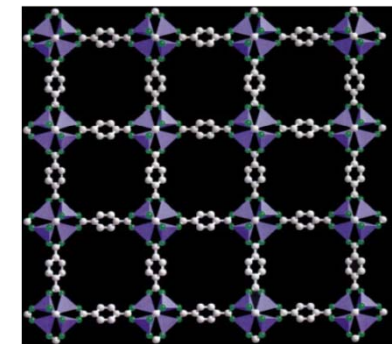
MOF-5



BDC



Zn, azul
O, verde
C, gris

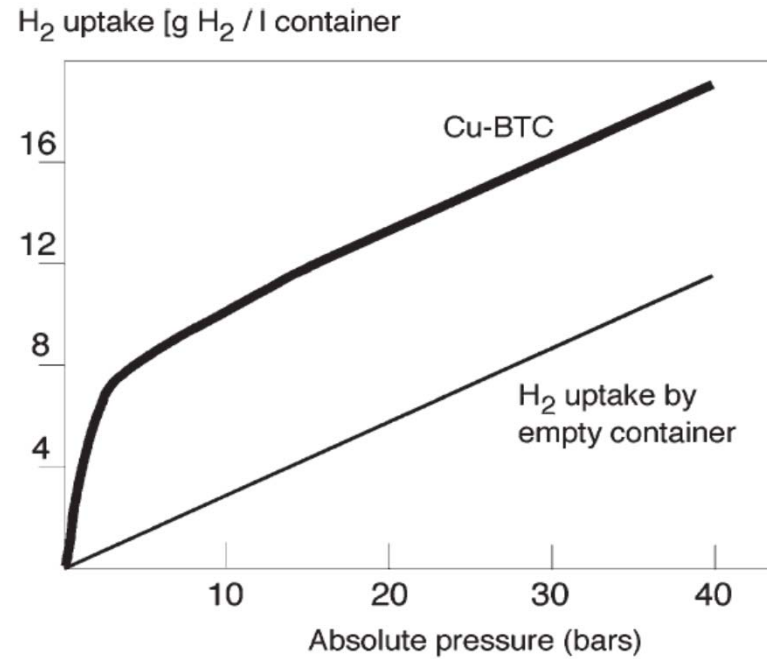


A lo largo del eje a

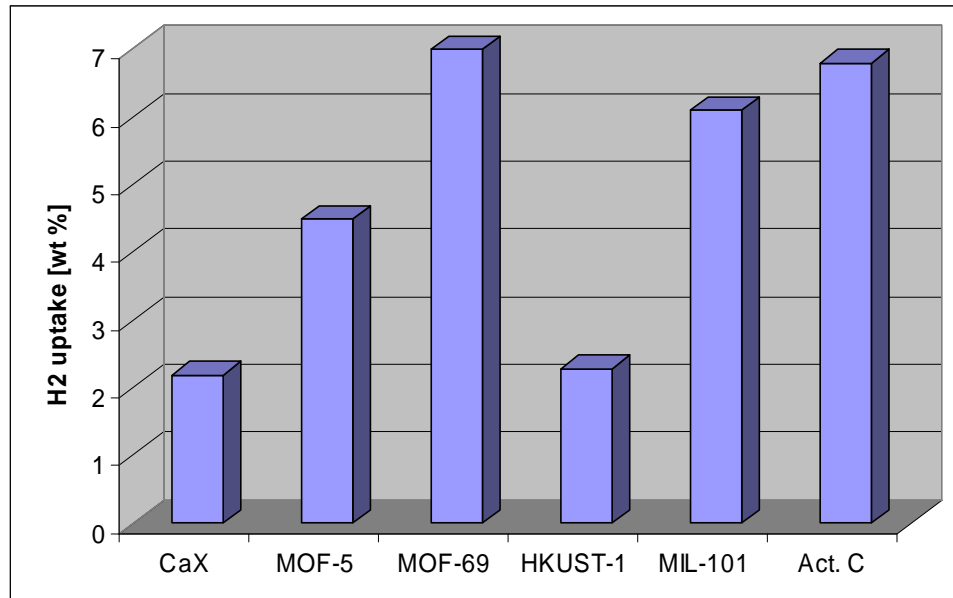
(Li et al., 1999)

BDC: 1,4-benzenodicarboxilato

Almacenamiento de H₂



(Ferey, 2008)

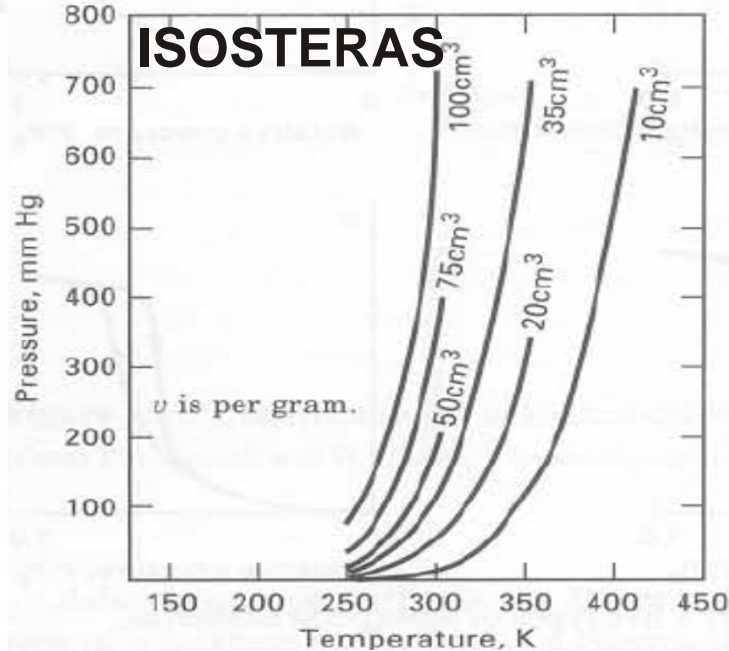
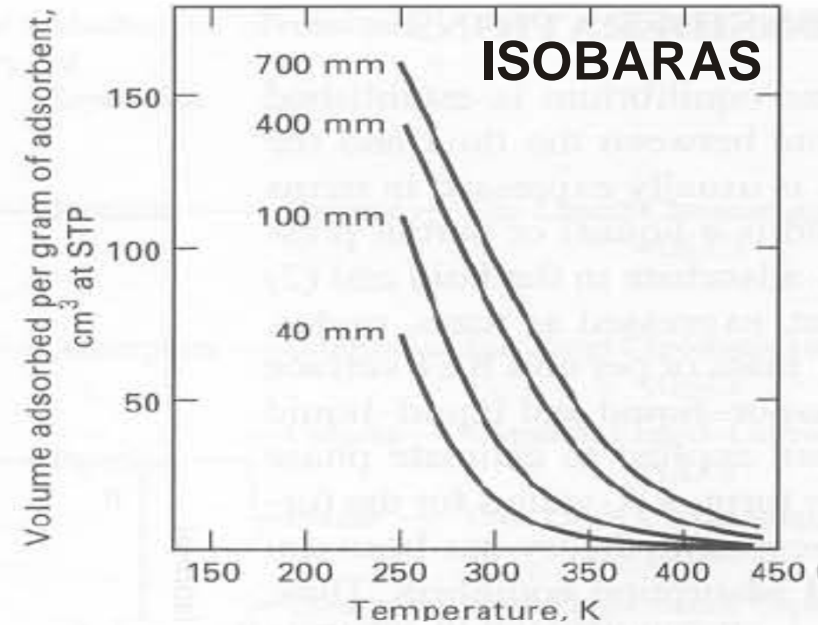
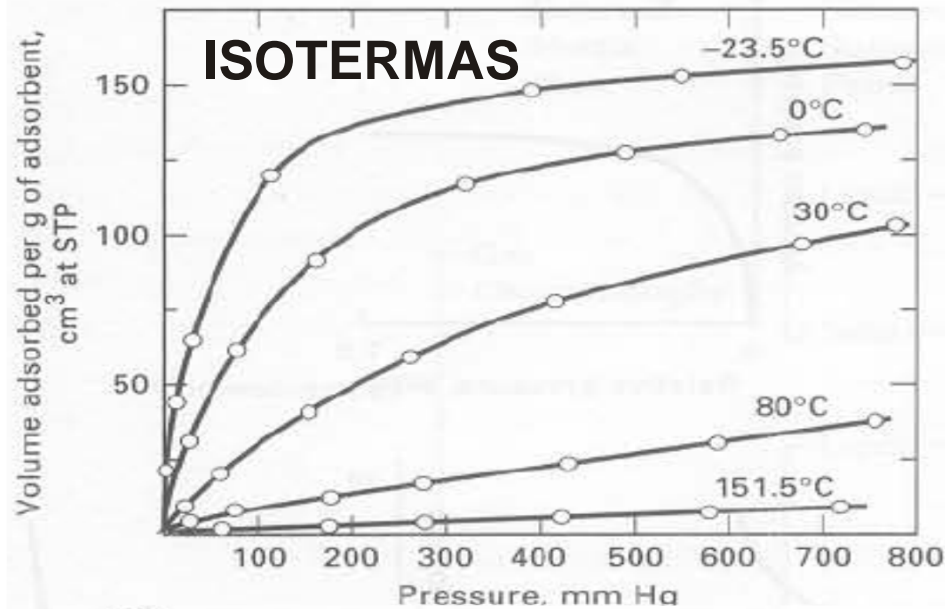


Material	Density [g/L]
CaX	1385
MOF-5	590
MOF-69	593

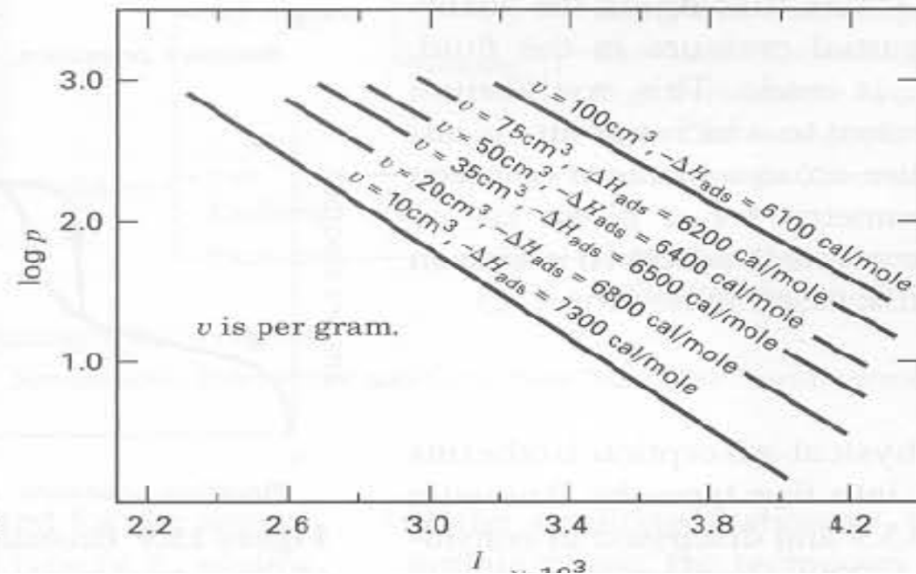
Ecuaciones de isotermas

- ✓ Distintas formas para el eq.
- ✓ Ley de Henry
- ✓ Isooterma de Langmuir
- ✓ Isooterma BET
- ✓ Isooterma de Freundlich
- ✓ Adsorción de mezclas
- ✓ Condensación capilar

Adsorción de NH₃ sobre carbón



CALORES ISOSTÉRICOS



$$C_s = K_a C$$

Ley de Henry

- Para adsorción física, en una superficie uniforme y a baja concentración.
- En tal caso, la relación de equilibrio entre las concentraciones en la fase fluida y en el adsorbente es lineal (análogamente a la solubilidad de gases en líquidos).

$$\left\{ \begin{array}{l} q = K'p \\ q = Kc \\ K = K'RT \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \frac{d \ln K'}{dT} = \frac{\Delta H_0}{RT^2} \\ \frac{d \ln K}{dT} = \frac{\Delta U_0}{RT^2} \\ \text{(Ec. Van't Hoff)} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} K' = K'_0 e^{-\frac{\Delta H_0}{RT}} \\ K = K_0 e^{-\frac{\Delta U_0}{RT}} \end{array} \right.$$

- $\ln K$ vs. $1/T$ da una línea recta.

Isoterma de Langmuir

- Para adsorción física en monocapa (originalmente pensada para quimisorción).
- Suposiciones: i) las moléculas se adsorben en un n° fijo de centros activos (CA) bien definidos y localizados, ii) en cada CA cabe una molécula, iii) todos los CA son energéticamente equivalentes, y iv) no hay interacciones sorbato-sorbato.

Veloc. adsorción $k_a p(1 - \theta)$, $\theta = q/q_s$

Veloc. desorción $k_d \theta$

En el equilibrio: $\frac{\theta}{1 - \theta} = \frac{k_a}{k_d} p = bp \Rightarrow \theta = \frac{q}{q_s} = \frac{bp}{1 + bp}$ $b = b_0 e^{-\frac{\Delta H_0}{RT}}$

- Cuando $p \rightarrow \infty$, $q \rightarrow q_s$; Cuando $p \rightarrow 0$, $q = q_s bp = K'p$

Isoterma BET

- Sucede a veces que los CA están espaciados y comienza la formación de una segunda capa (*adsorción en multicapa*) a presiones inferiores a las necesarias para completar una monocapa.
- Cada molécula de la primera capa es un CA para la segunda y subsecuentes capas.
- Las moléculas que no están en contacto con el sólido se consideran esencialmente como un líquido saturado.

$$q/q_m = \frac{b \frac{p}{p_s}}{\left(1 - \frac{p}{p_s}\right) \left(1 - \frac{p}{p_s} + b \frac{p}{p_s}\right)} \Rightarrow \frac{p}{q(p_s - p)} = \frac{1}{q_m b} + \frac{b-1}{q_m b} \frac{p}{p_s}$$

Isoterma de Freundlich

$$q = kp^n$$

$$\log q = \log k + n \log p$$

- Ecuación empírica, donde $n= 0-1$. Si $n= 1$, se convierte en la ley de Henry.

Carbón activo Calgón, en este caso m (kg adsorbato/kg c.a.)= kp^n

Adsorbato	Temperatura (K)	$k \times 100$	n	Presión parcial (Pa)
Acetone	311	1.234	0.389	0.69–345
Acrylonitrile	311	2.205	0.424	0.69–103
Benzene	298	12.602	0.176	0.69–345
Chlorobenzene	298	19.934	0.188	0.69–69
Cyclohexane	311	7.940	0.210	0.69–345
Dichloroethane	298	8.145	0.281	0.69–276
Phenol	313	22.116	0.153	0.69–207
Toluene	298	20.842	0.110	0.69–345
Trichloroethane	298	25.547	0.161	0.69–276
m-Xylene	298	26.080	0.113	0.69–6
m-Xylene	298	28.313	0.0703	6.9–345

Adsorción de mezclas

Para una mezcla binaria de A y B, en el equilibrio:

$$(k_A)_a p_A (1 - \theta_A - \theta_B) = (k_A)_d \theta_A, \theta_A = q_A / (q_A)_s$$

$$(k_B)_a p_B (1 - \theta_A - \theta_B) = (k_B)_d \theta_B, \theta_B = q_B / (q_B)_s$$

Resolviendo
Las dos ecs.:

$$q_A = \frac{(q_A)_s b_A p_A}{1 + b_A p_A + b_B p_B} \quad q_B = \frac{(q_B)_s b_B p_B}{1 + b_A p_A + b_B p_B}$$

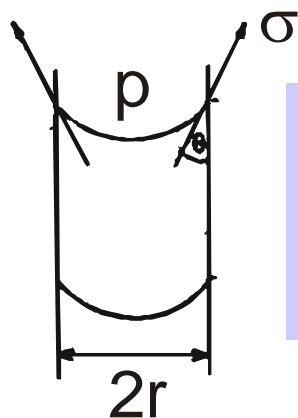
En general:

$$q_i = \frac{(q_i)_s b_i p_i}{1 + \sum_j b_j p_j} \quad \text{Y también:} \quad q_i = \frac{(q_i)_{\max} b_i p_i^{n_i}}{1 + \sum_j b_j p_j^{n_j}}$$

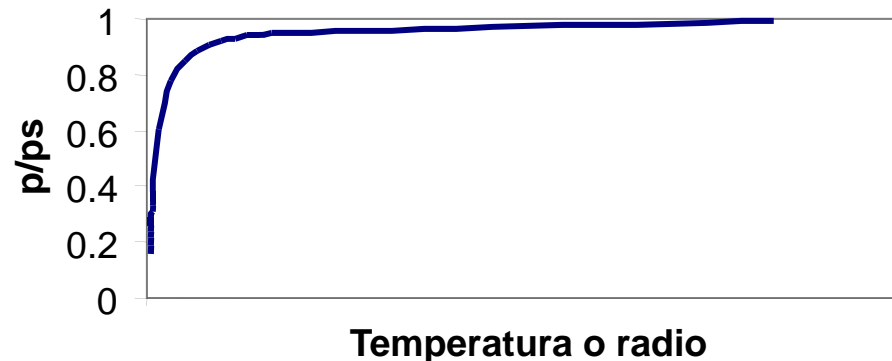
(Modelo de Langmuir extendido)

Condensación capilar: ec. de Kelvin

- En un adsorbente poroso, conforme aumenta p/p_s , hay una progresión continua, desde adsorción en multicapa a condensación capilar, en la que los poros menores acaban llenándose de líquido.
- La condensación capilar se produce para presiones relativas de 0,6-0,7. La isoterma es de tipo IV (con histéresis).
- Las moléculas que no están en contacto con el sólido se consideran esencialmente como un líquido saturado.



$$\frac{p}{p_s} = e^{-\frac{2\sigma V_m \cos \theta}{rRT}}$$

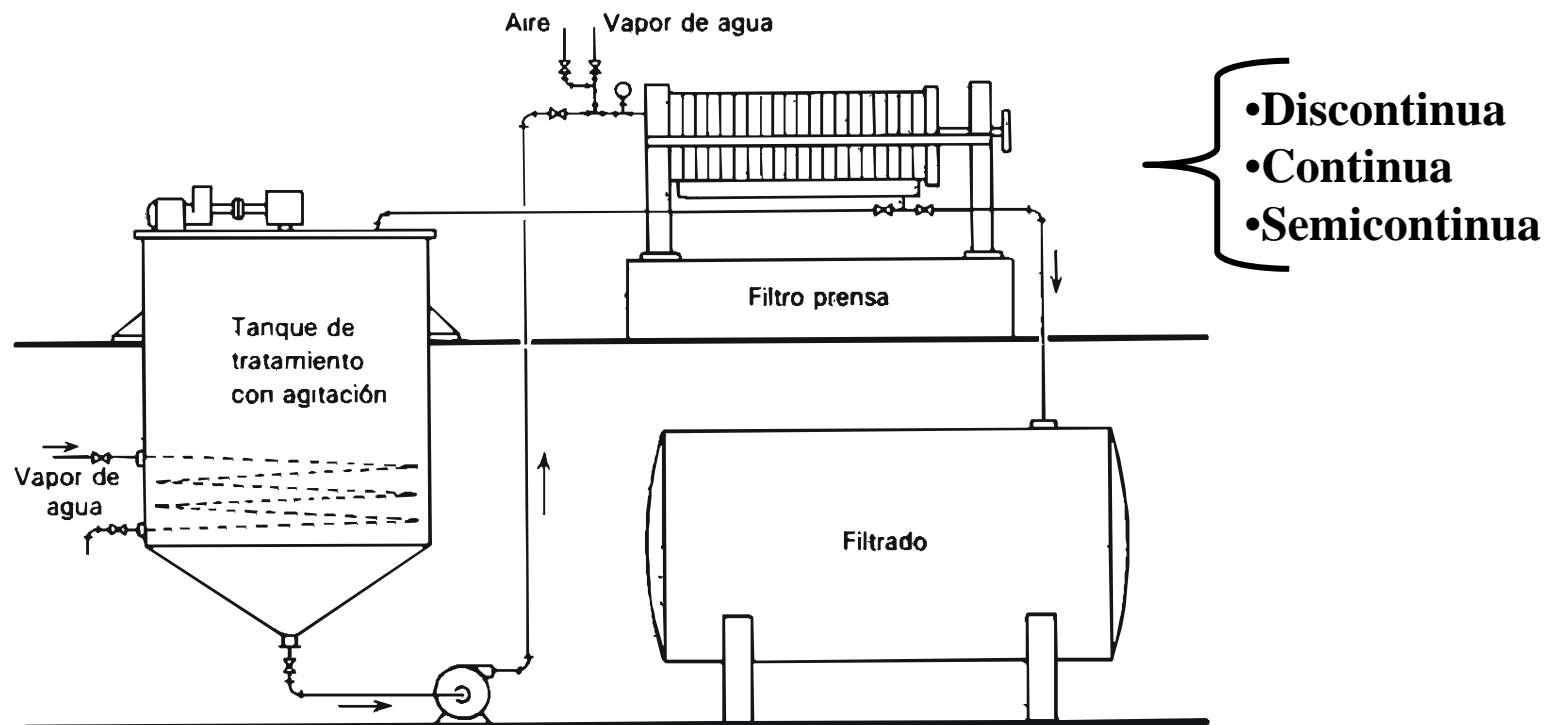


Sistemas de adsorción

- ✓ Filtración por contacto (adsorción en slurry)
- ✓ Adsorción en lecho fijo (percolación)
- ✓ Adsorción por oscilación térmica (Thermal-swing adsorption, **TSA**)
- ✓ Adsorción por oscilación de presión (Pressure-swing adsorption, **PSA**)
- ✓ Adsorción continua

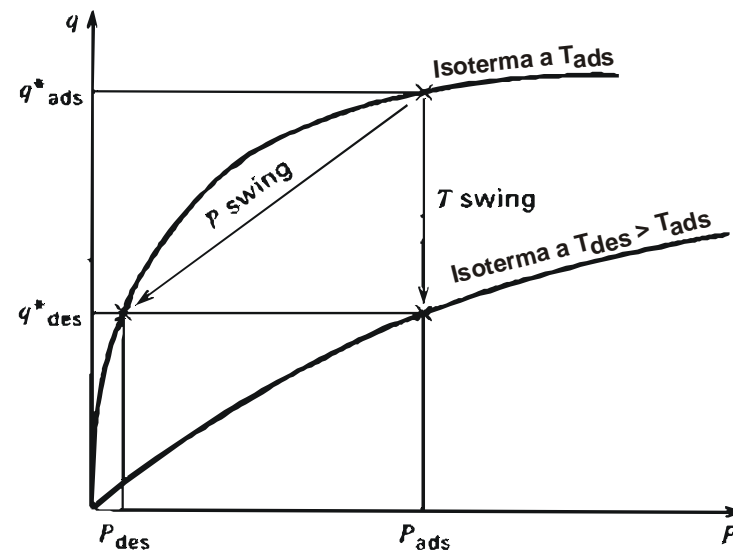
Filtración por contacto

- Con partículas de menos de 1 mm, para reducir las resistencias externa (agitación) e interna.
- Para eliminar pequeñas cantidades de moléculas grandes en agua (como tintes, etc.). El sólido no se regenera.



Adsorción en lecho fijo

- Con partículas entre 0,05 y 1,2 cm. Siempre se alimenta desde arriba.
- El adsorbente puede desecharse (COVs/agua) o regenerarse (separación y purificación de gases).
- La regeneración puede hacerse subiendo la temperatura (TSA) o bajando la presión (PSA).
- Si en la filtración por contacto el líquido tiene siempre algo de adsorbato, en este caso se puede obtener un líquido casi puro mientras el lecho no esté saturado.



Lecho fijo ideal

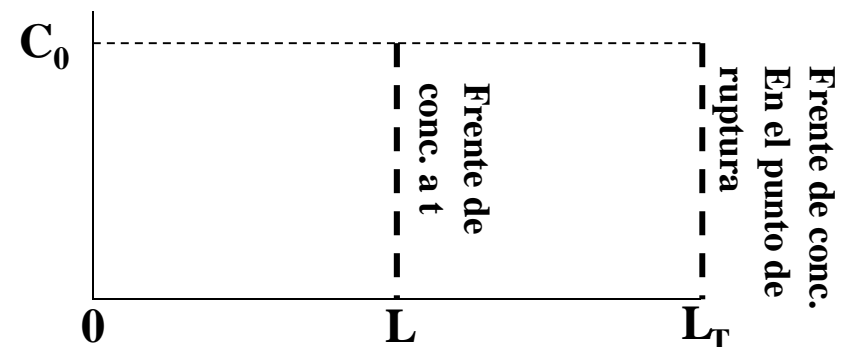
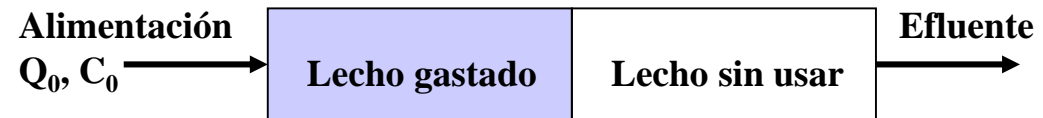
- Si se alcanza el **equilibrio** entre el fluido y el adsorbente **instantáneamente** (cuando las resistencias interna y externa son pequeñas, la dispersión axial es despreciable y el adsorbente inicialmente está libre de adsorbato*).

$$Q_0 C_0 t = q_s S L / L_T$$

$$L = \frac{Q_0 C_0 t}{q_s S} L_T$$

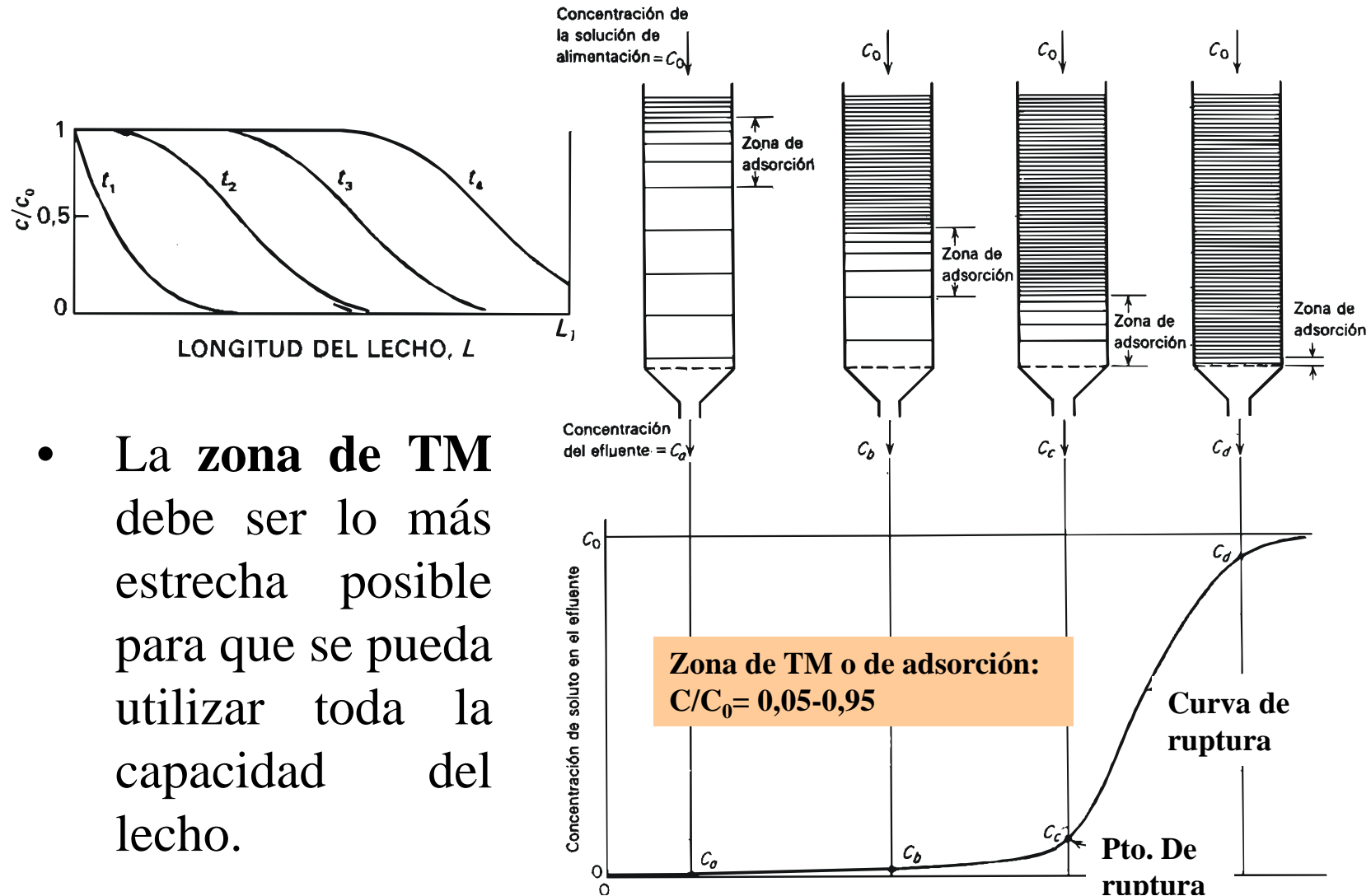
$$W = S \frac{L}{L_T}$$

$$* t = \frac{L}{L_T} \frac{S(q_s - q_0)}{Q_0 C_0}$$

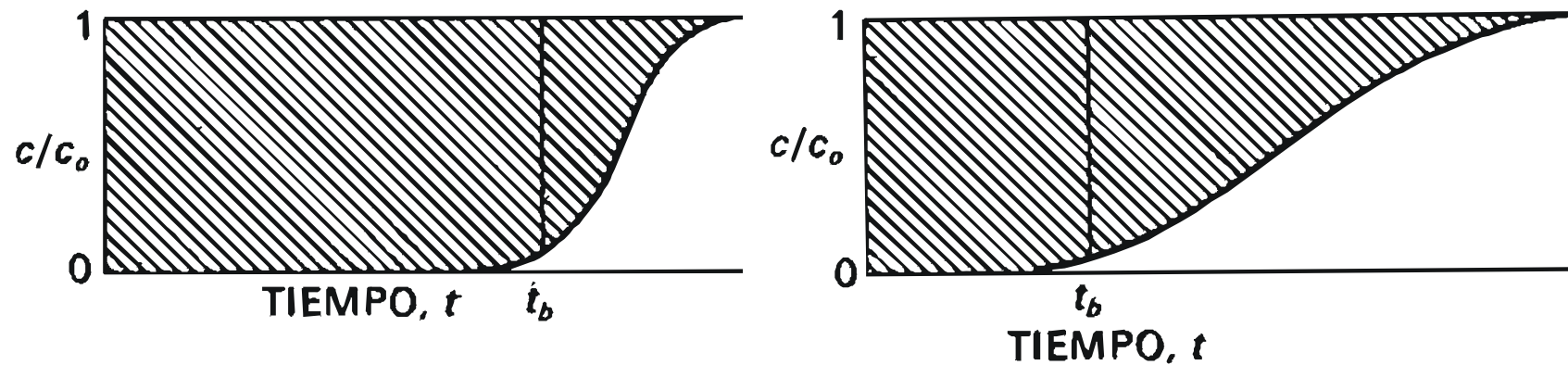


q_s = cantidad adsorbida por unidad de masa en equilibrio con C_0
 S = masa de adsorbente en el lecho
 W = fracción de lecho gastado

Lecho fijo real. Curva de ruptura



- La **zona de TM** debe ser lo más estrecha posible para que se pueda utilizar toda la capacidad del lecho.

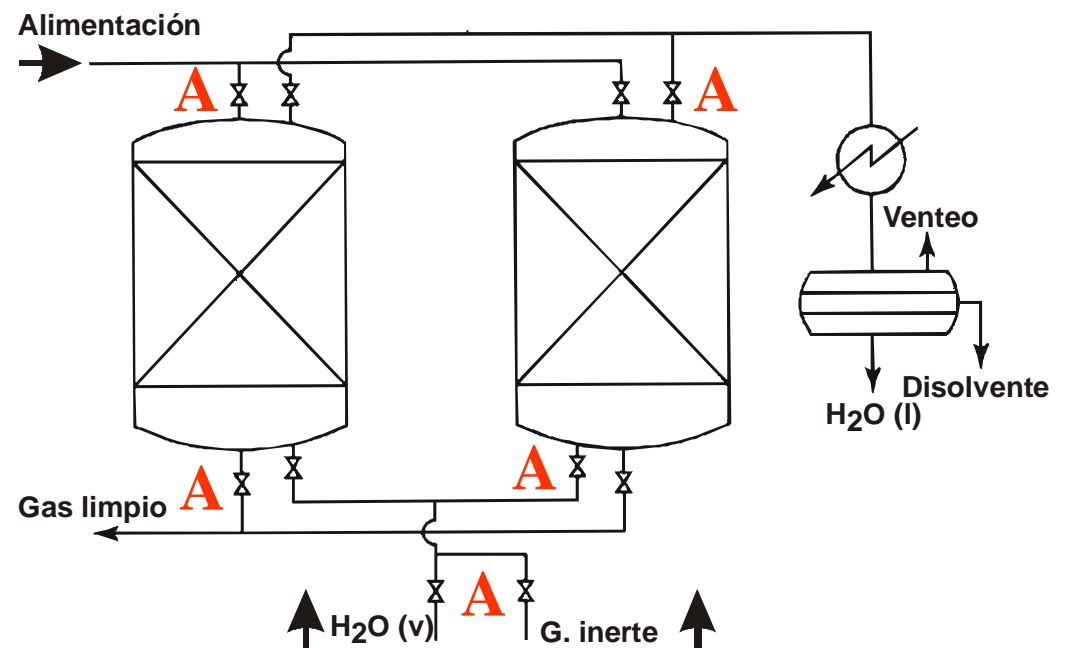


- La **forma de la curva** depende de: las velocidades de adsorción y del fluido, la naturaleza del equilibrio de adsorción (favorable/desfavorable), las concentraciones de adsorbato en la alimentación y en el sólido, la longitud del lecho...
- El **tiempo de ruptura** se toma a una concentración relativa de 0,05-0,1. *Éste depende de la altura del lecho, el tamaño de partícula del sólido, la velocidad de flujo, la concentración de adsorbato...*

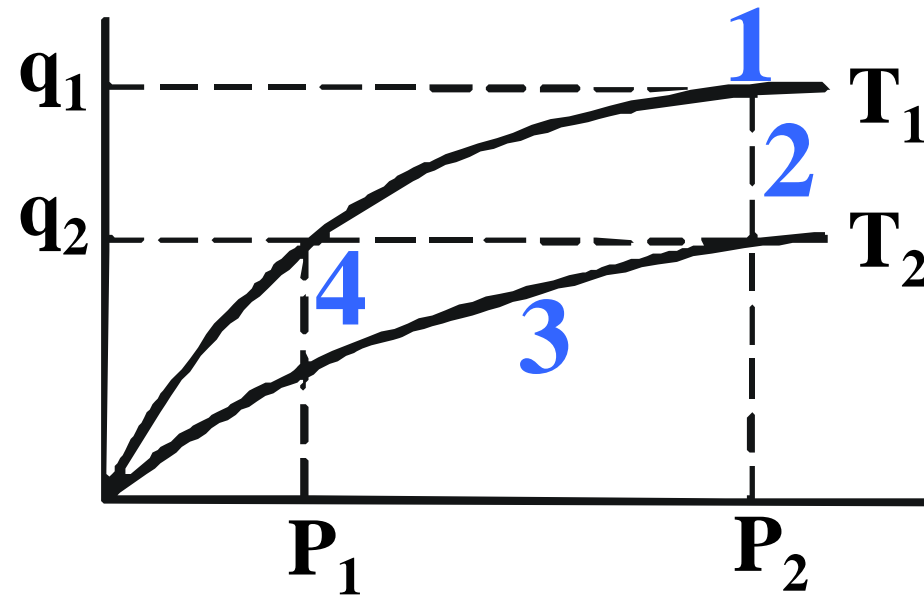
- El área limitada por la curva y la ordenada para $C/C_0 = 1$ es proporcional a la **cantidad total adsorbida** si todo el lecho alcanza el equilibrio con la alimentación.
- Si la adsorción es favorable, el frente de concentración puede llegar a considerarse como una **vertical**. En tal caso, la anchura de la ZTM es nula y todo el lecho se utiliza (lecho fijo ideal).
- La adsorción es un **proceso exotérmico**, con lo que puede originarse un aumento de la temperatura de un lecho de entre 10 y 50 °C cuando se tratan vapores con solamente un 1 % de adsorbato.

TSA

- El calentamiento para la regeneración se hace: i) con serpentines dentro del lecho o ii), más comúnmente, con un gas caliente de purga.
- Tanto para adsorción en fase gas como en líquida.
- El gas de purga evita también que se produzca la readsorción.
- La temperatura de la regeneración no debe dañar al adsorbente.



1. Adsorción a T_1 .
2. Calentamiento del lecho hasta T_2 .
3. Desorción a T_2 .
4. Enfriamiento del lecho hasta T_1 .



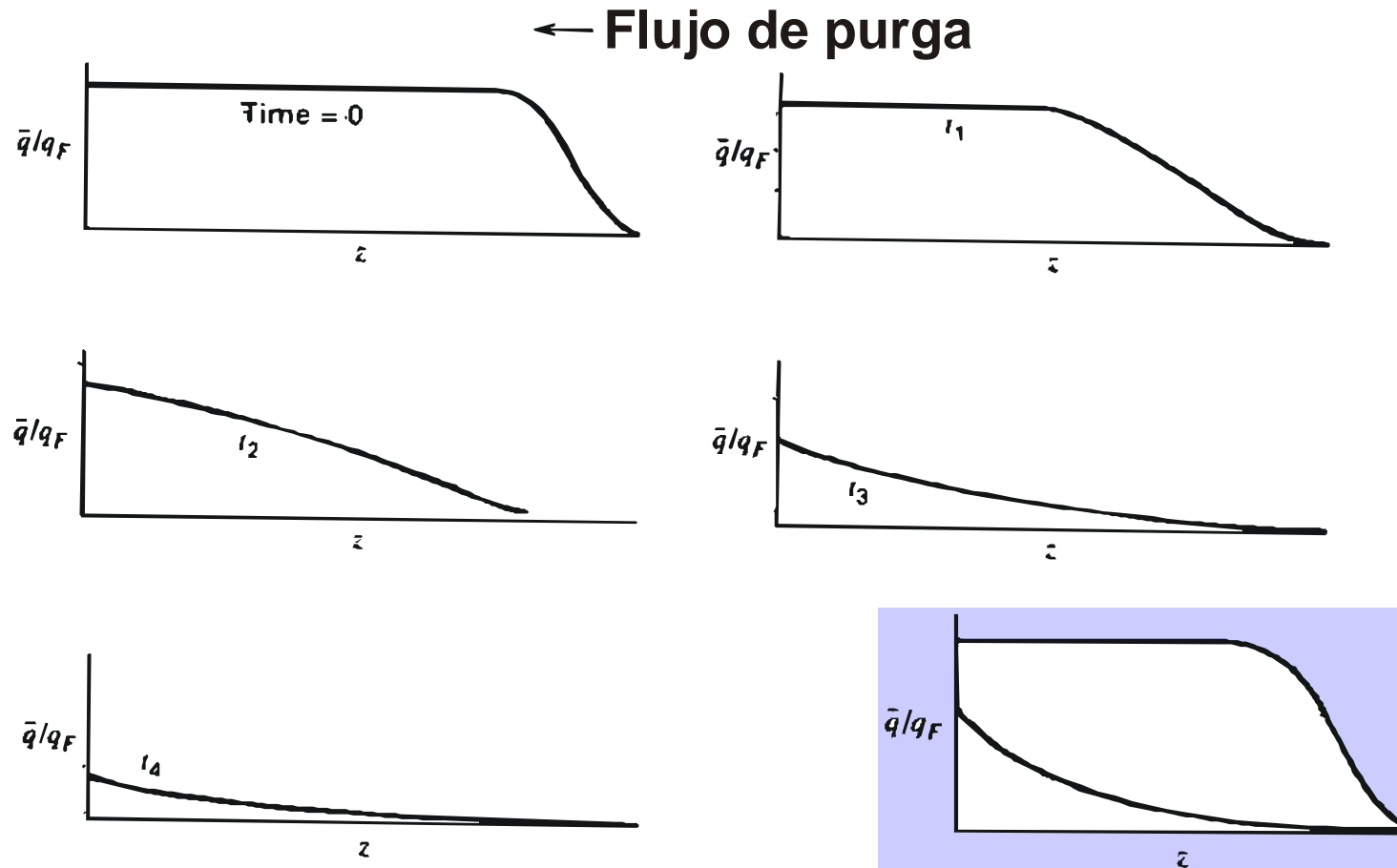
En la práctica, 2 y 3 y 1 y 4 se combinan

La temperatura de desorción en el lecho se alcanza precalentando la purga, que también puede ser una porción de la alimentación o del efluente. CASOS:

1. Adsorbato valioso y condensable: purga, gas no cond.
2. Adsorbato valioso y difícil de cond.: purga, vapor de agua.
3. Adsorbato sin valor: purga, combustible y/o aire.

- Los **ciclos de TSA pueden durar horas o días**, lo que hace que se requieran lechos más largos, que además son cada vez más eficaces.
- **Si la ZTM es muy ancha**, la utilización del lecho es mala. En este caso se utilizan dos **lechos en serie** para la adsorción: cuando el que está más cerca de la alimentación se agota se conmuta a regeneración, el segundo lecho ocupa su lugar y un tercero (ya regenerado) ocupa el lugar de éste. En total hacen falta tres lechos. Siempre se envía a regenerar un lecho totalmente agotado.
- Se usan **lechos en paralelo** cuando el flujo de alimentación es muy grande.
- Si la alimentación se hace de arriba abajo, conviene hacer la **regeneración a contracorriente** (de abajo arriba) para que las sustancias desorbidas no vean nunca lecho sin usar.

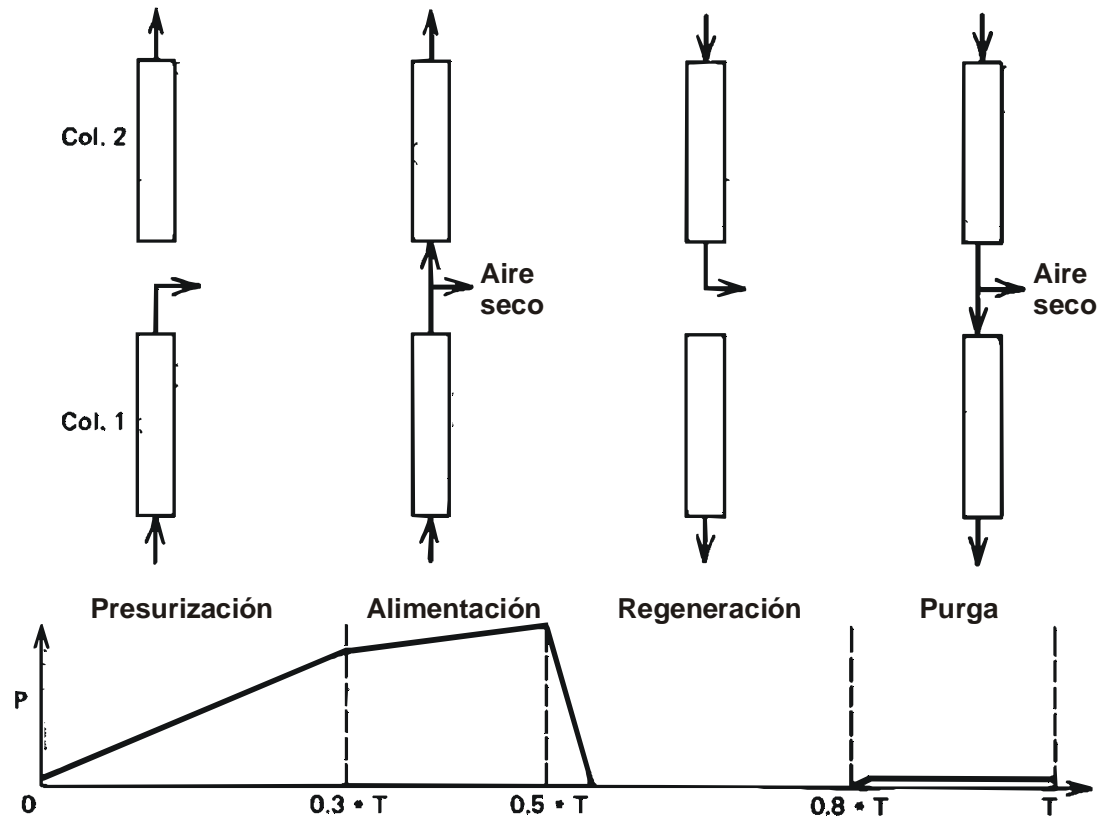
Regeneración a contracorriente



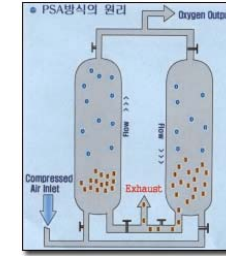
Durante la regeneración los perfiles de carga en el lecho disminuyen progresivamente. Al terminar, la carga residual puede o no ser nula, disminuyendo la capacidad cíclica de uso del adsorbente.

PSA

- PSA y VSA (vacuum-swing adsorption) utilizan **trabajo mecánico** para aumentar la presión o hacer vacío.
- Si TSA puede utilizarse para gases y líquidos, PSA sólo para gases.
- Originalmente se utilizó PSA para eliminar la humedad, como **secador sin calor**. Ahora para separar O_2/N_2 , para eliminar impurezas y contaminantes del aire, separar H_2 .

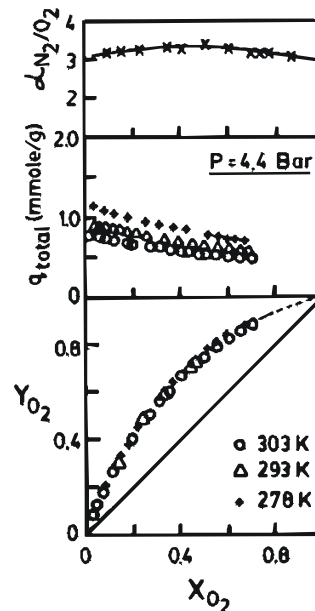
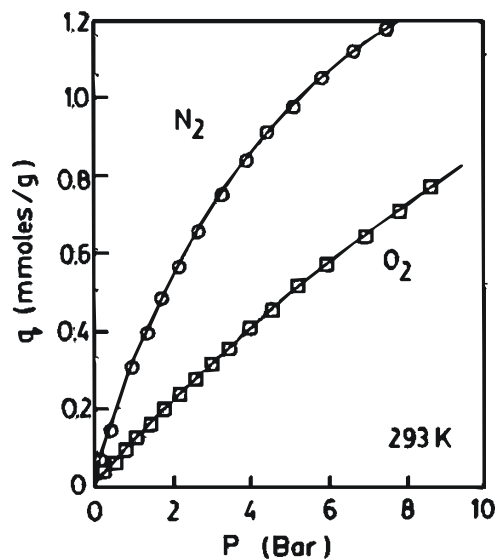


Separación de aire

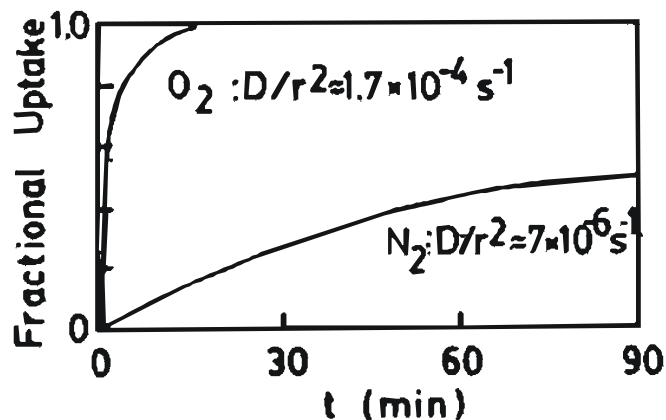
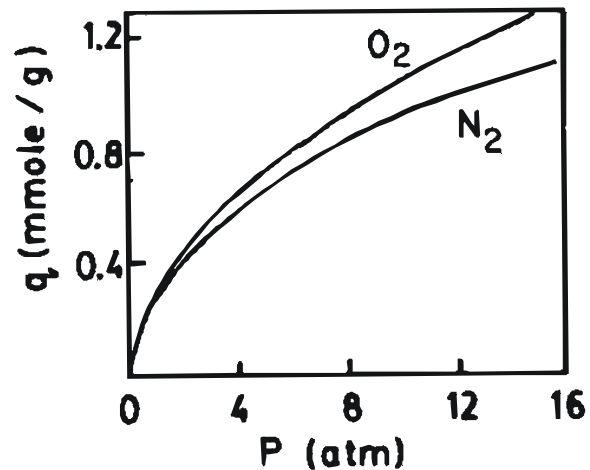


Con zeolitas (p.ej. 5A, abajo, o 13X), donde la separación está controlada por el equilibrio de adsorción, favorable al N_2 .

- Se puede lograr O_2 con una pureza del **96-97 %** (2-3 % Ar).
- A gran escala se aumenta la recuperación de O_2 a base de un paso de **igualación de presiones**.
- Se utilizan **varios adsorbedores** y ciclos complejos para reducir el consumo energético.



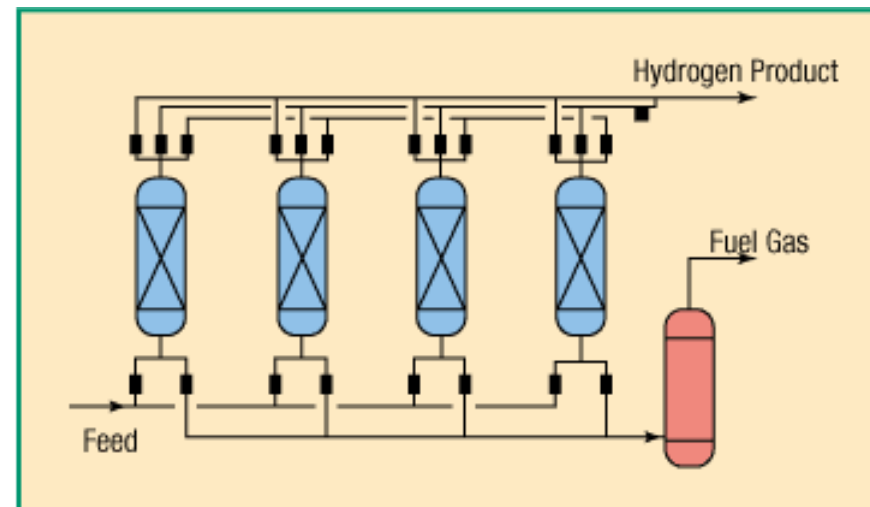
Con tamices moleculares de carbón, donde difunde más rápido el O₂.



- Se puede lograr N₂ de hasta el 99,9 %.
- La **desorción** se hace a vacío más que con purga.
- La presión varía en cada ciclo desde 0,1 hasta 4 atm.
- Los **ciclos duran 1 min.**

Purificación de H₂

- La separación de H₂ de HCs es la aplicación ideal para el PSA.
- El H₂ esencialmente no se adsorbe y se pueden obtener purezas de hasta el 99.9999 %.
- La presión oscila entre 1 y 30 atm, consiguiéndose recuperaciones de H₂ de hasta el 86 %.

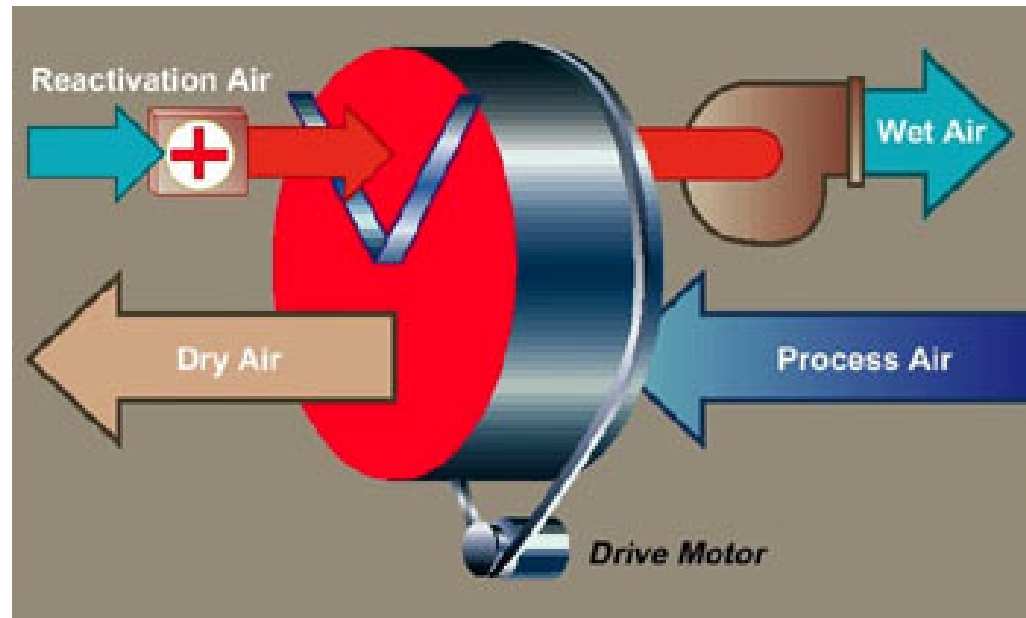
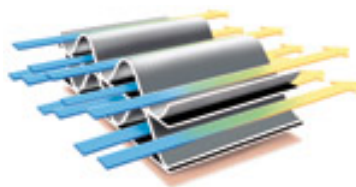


Rotores adsorbentes

* Permitirían **reducir** en un 25 % la demanda de electricidad doméstica en las regiones húmedas

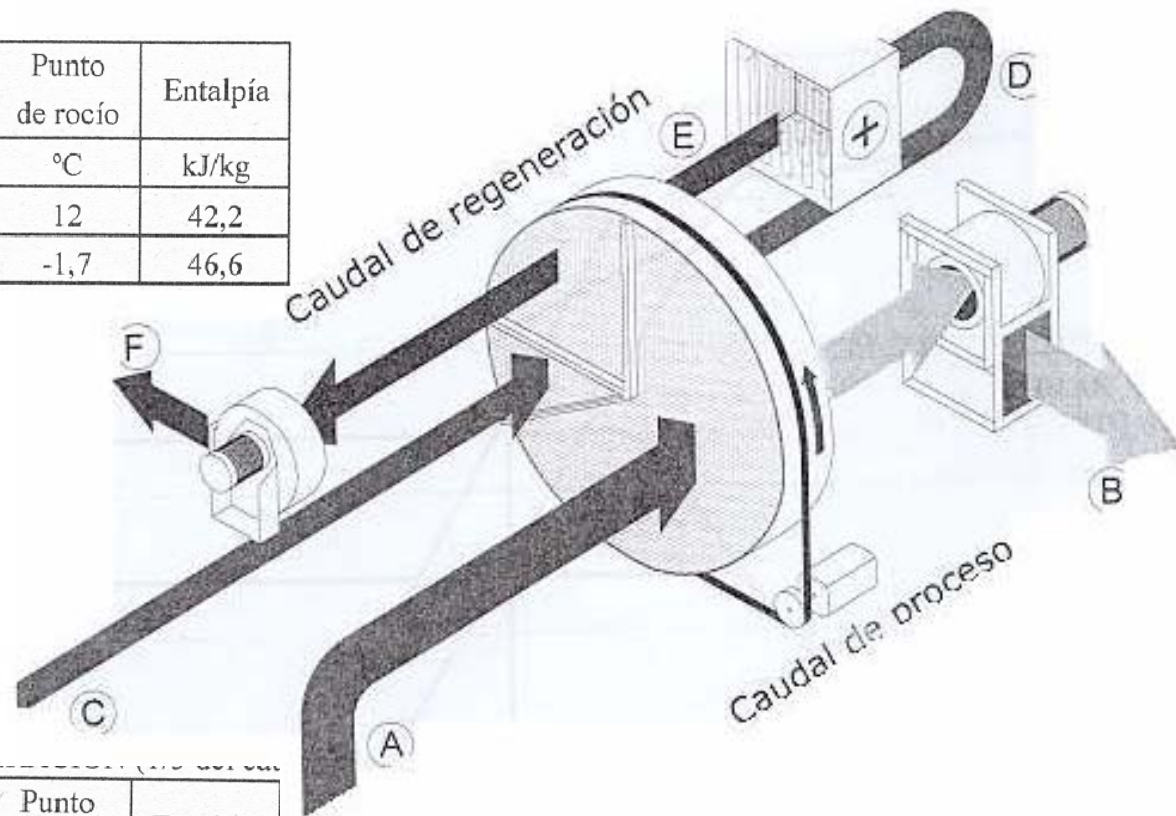
* Mejoran la calidad del **ambiente interior**

* Desplazan a los equipos basados en el uso de **clorofluorocarbonados**



* Utilizan, entre otros, gel de sílice, alúmina, zeolitas, LiCl, polímeros, etc.

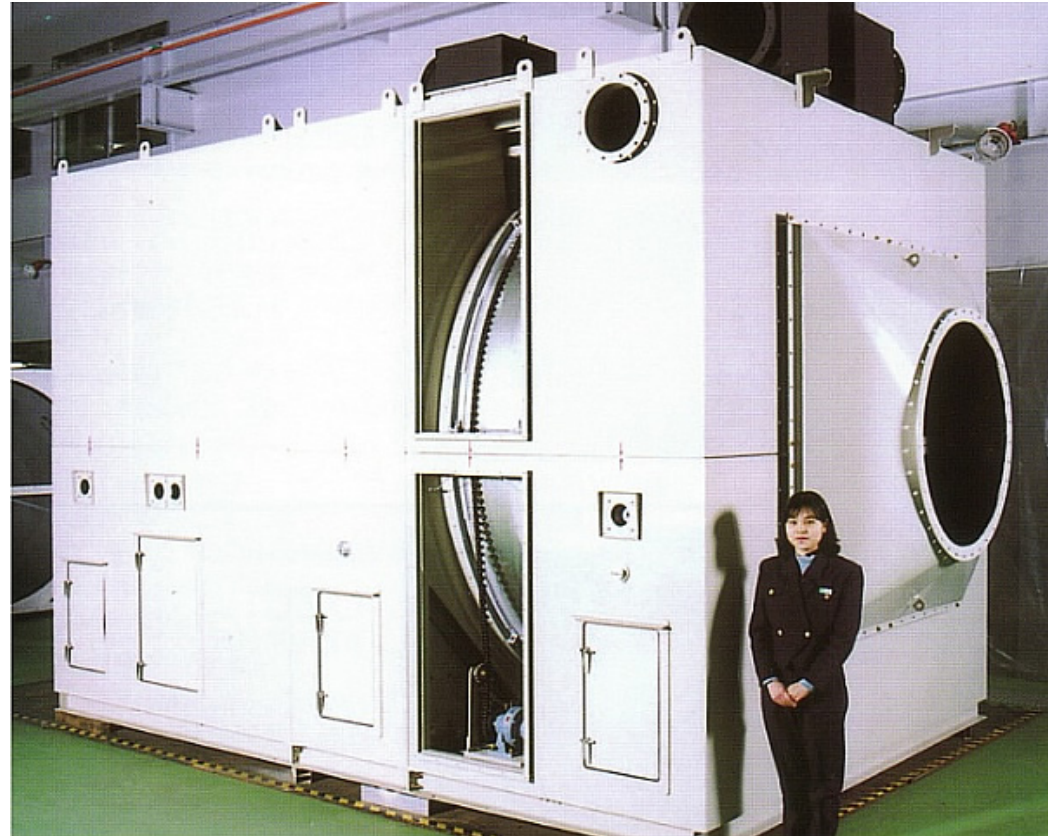
	Temperatura bulbo seco	Humedad		Punto de rocío	Entalpía
		Absoluta	Relativa		
	°C	g/kg	%	°C	kJ/kg
A	20	8,7	60%	12	42,2
B	38	3,4	8,1%	-1,7	46,6



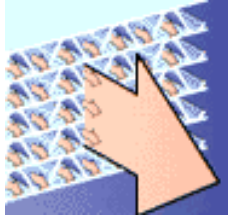
	Temperatura bulbo seco	Humedad		Punto de rocío	Entalpía
		Absoluta	Relativa		
	°C	g/kg	%	°C	kJ/kg
C	20	8,7	60%	12	42,2
D	70	8,5	4,4%	11,7	92,7
E	155	8,5	0,25%	11,7	178,4
F	48	24,4	34%	28,3	111,4

* Utilizan **energía térmica de bajo nivel** (~ 150 °C): solar, industrial residual, aire procedente de refrigeradores, etc.

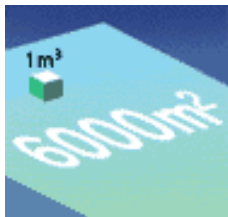
* No necesitan de un intercambiador de calor de agua, directamente **toman la energía del gas caliente**, lo que reduce la necesidad de equipo



www.seibu-giken.co.jp



* Como hay muchos pequeños agujeros en la sección transversal del panel y la pared es muy fina (unos pocos cientos de micrómetros), se opera con **pequeñas pérdidas de carga**



* Estas estructuras que combinan superficies **planas y corrugadas** proporcionan grandes áreas superficiales



* **Ligeros y fuertes** a la vez (de papel, fibra de vidrio, alúmina, aluminio, acero, etc.)