

# Operaciones Unitarias 2

## Ejercicios Ago – Dic 2021

### Unidad 1 – Fundamentos de transferencia de masa

#### EJERCICIO 1 (4 puntos, fecha límite 17-SEP-2021)

Estimar la difusividad del vapor de ciclohexano ( $C_6H_{12}$ ) en aire a 25 °C y 1.5 atm, mediante (A) la teoría cinética de Chapman-Enskog, y (B) el método de Fuller.

RESPUESTA: (A) 0.0518  $cm^2/s$ , (B) 0.0558  $cm^2/s$

#### EJERCICIO 2 (4 puntos, fecha límite 20-SEP-2021)

El éter dietílico ( $C_2H_5-O-C_2H_5$ ) es un compuesto volátil altamente inflamable, muy utilizado en laboratorios e industrias de procesos químicos, y que antiguamente se usó como anestésico. Como es más denso que el aire, su vapor tiende a acumularse en las zonas bajas, aumentando el riesgo de una explosión. Estimar la difusividad del vapor de éter dietílico a 50 °C y 1.2 atm, empleando el método de Chapman-Enskog.

RESPUESTA: 0.0854  $cm^2/s$

#### EJERCICIO 3 (6 puntos, fecha límite 23-SEP-2021)

Estimar la difusividad en una mezcla equimolar de nitrógeno y etano, a 15 °C y 47 atm.

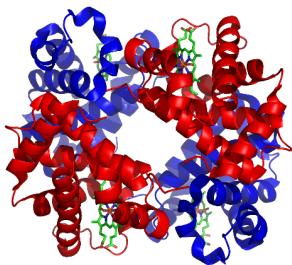
RESPUESTA: 0.00221  $cm^2/s$

#### EJERCICIO 4 (6 puntos, fecha límite 24-SEP-2021)

En el buceo de profundidad, generalmente se necesita respirar mezclas de gases diferentes al aire, debido a los efectos narcóticos del nitrógeno a alta presión. Un tipo de mezcla frecuentemente empleada, el trimix, está formada de oxígeno, helio y nitrógeno en determinadas proporciones. Calcular la difusividad del oxígeno (a 37 °C y 4 bar) en trimix 15/55 (15%  $O_2$ , 55% He, 30%  $N_2$ ).

RESPUESTA: 0.104  $cm^2/s$

#### EJERCICIO 5 (4 puntos, fecha límite 29-SEP-2021)



La hemoglobina (ilustrada a la izquierda) es una molécula compleja encargada de transportar oxígeno y dióxido de carbono en la sangre. Tiene un peso molecular cercano a los 64,500 g/mol (Van Beekvelt, 2001). La difusividad de la hemoglobina, a dilución infinita en agua a 25 °C, es  $6.9 \times 10^{-7} cm^2/s$  (Cussler, 1997). Estimar su difusividad a dilución infinita en agua a 37 °C.

**Referencias:**

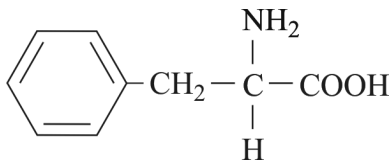
Cussler E.L. (1997). "Diffusion: Mass Transfer in Fluid Systems". 2nd Edition, Cambridge University Press.  
Van Beekvelt M.C., Colier W.N., Wevers R.A., Van Engelen B.G. (2001). "Performance of near-infrared spectroscopy in measuring local  $O_2$  consumption and blood flow in skeletal muscle". *J Appl Physiol* **90** (2): 511–519.

RESPUESTA:  $9.22 \times 10^{-7} cm^2/s$

#### EJERCICIO 6 (6 puntos, fecha límite 30-SEP-2021)

Estimar el paracoro del: (A) n-hexano, (B) iso-octano, (C) metil-terbutil-éter, (D) fenol, (E) tiofeno.

RESPUESTAS: (A) 270, (B) 343.7, (C) 245.4, (D) 219.4, (E) 188.3  $g^{1/4} \cdot cm^3/mol \cdot s^{1/2}$

**EJERCICIO 7** (8 puntos, fecha límite 01-OCT-2021)

La **fenilalanina** ( $C_9H_{11}NO_2$ ) es un alfa-aminoácido neutro y no polar. Al ser un aminoácido esencial para el ser humano, debe estar presente en la alimentación, pues no puede ser sintetizado por el organismo. La fenilalanina también es importante en relación a la fenilcetonuria, un desorden genético en el que el organismo no puede metabolizar adecuadamente este aminoácido, por lo que se

debe vigilar su ingesta. Aplicando el método de Tyn y Calus, estimar la difusividad de la fenilalanina a dilución infinita en agua a  $37^\circ C$  (asumir que la molécula no está ionizada).

RESPUESTA:  $1.123 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$

**EJERCICIO 8** (4 puntos, fecha límite 08-OCT-2021)

Resolver cada una de las siguientes ecuaciones diferenciales. Cuando se proporcionen condiciones de frontera, usarlas para obtener la solución particular.

RESPUESTAS:

(A)  $\frac{dy}{dx} - 3x^2 + 1 = 0$

$y = x^3 - x + C$

(B)  $\frac{dy}{dx} + e^{-3x} = 0$

$y = \frac{1}{3}e^{-3x} + C$

(C)  $x \frac{dy}{dx} - 2y = 6$  con  $y = -1$  cuando  $x = 1$

$y = 2x^2 - 3$

(D)  $\frac{d}{dx} \left( x \frac{dy}{dx} \right) = 0$

$y = C_1 \ln x + C_2$

(E)  $\frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{dy}{dx} - 2y = 0$

$y = C_1 e^{2x} + C_2 e^{-x}$

(F)  $\frac{d^2 y}{dx^2} + 9y = 0$

$y = C_1 \sin(3x) + C_2 \cos(3x)$

(G)  $\frac{d^2 y}{dx^2} - 4 \frac{dy}{dx} + 5y = 0$

$y = C_1 e^{2x} \sin x + C_2 e^{2x} \cos x$

(H)  $2 \frac{d^2 y}{dx^2} + 3 \frac{dy}{dx} = 0$  sujeta a  $y(0) = 11$  y  $y'(0) = -10.5$

$y = 4 + 7e^{-1.5x}$

**EJERCICIO 9** (4 puntos, fecha límite 20-OCT-2021)

Se tienen dos recipientes muy grandes, llenos de dos gases puros A y B respectivamente. Los recipientes están unidos por un tubo capilar delgado de longitud  $L$ . La temperatura  $T$  y la presión  $P$  del sistema son constantes. Asumiendo estado estable, encontrar el perfil de concentración del componente A ( $C_A$ ) en función de la posición  $x$ , y la densidad de flujo molar ( $n_A$ ) a través del capilar.



RESPUESTA:  $C_A = \frac{P}{RT} \cdot \frac{x}{L}$ ,  $n_A = \frac{-D_{AB} P}{RTL}$

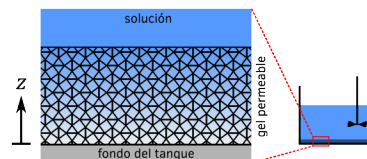
**EJERCICIO 10** (6 puntos, fecha límite 28-OCT-2021)

Considérese un catalizador con forma cilíndrica de radio  $R$  en el que ocurre la reacción química  $A \longrightarrow B$  con una cinética de orden cero ( $-r_A = k_0$ ). La concentración del reactivo A en la superficie del cilindro es  $C_{A,s}$ . Asumiendo que sólo ocurre transferencia de masa en la dirección radial, determinar el perfil de concentración de A.

$$\text{RESPUESTA: } C_A = C_{A,s} - \frac{k_0}{4\mathcal{D}_{AB}} [R^2 - r^2]$$

**EJERCICIO 11** (6 puntos, fecha límite 29-OCT-2021)

En un tanque se tiene una solución de un reactivo A con concentración  $C_0$ . El fondo del tanque se encuentra recubierto con una capa de gel permeable de espesor  $L$ . El reactivo A se difunde a través del gel, donde ocurre la reacción química  $A \longrightarrow B$  con cinética de primer orden ( $-r_A = kC_A$ ). Determinar el perfil de concentración de A en el gel, asumiendo estado estable.



$$\text{RESPUESTA: } C_A = C_0 \frac{\cosh\left(z\sqrt{k/\mathcal{D}_{AB}}\right)}{\cosh\left(L\sqrt{k/\mathcal{D}_{AB}}\right)}$$

## Unidad 2 – Transferencia de masa por convección

**EJERCICIO 12** (6 puntos, fecha límite 04-NOV-2021)

Para un equipo de transferencia de masa, que opera a 25 °C y 0.8 atm, se sabe que el coeficiente de transferencia de masa es  $k_G^0 = 0.272$  kmol/atm·m<sup>2</sup>·h. El mismo equipo se va a utilizar para evaporar pentano, bajo las mismas condiciones de temperatura y presión. En la superficie donde ocurre la evaporación, la presión parcial de pentano es igual a su presión de vapor (0.673 atm a 25 °C), y el aire lejos de dicha superficie se puede asumir libre de pentano. Determinar los coeficientes de transferencia de masa  $k_G$ ,  $k_C$  y  $k_y$ .

$$\text{RESPUESTA: } k_G = 0.595 \text{ kmol/atm}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}, \quad k_C = 14.56 \text{ m/h}, \quad k_y = 0.476 \text{ kmol/m}^2\cdot\text{h}$$

**EJERCICIO 13** (8 puntos, fecha límite 12-NOV-2021)

Se necesita promover el crecimiento de un microorganismo aerobio en un medio de cultivo líquido. Para mantener la concentración necesaria de oxígeno disuelto, se va a burbujear oxígeno puro en el fondo del tanque. Las burbujas de oxígeno tienen un diámetro promedio de 2.5 mm. El líquido se mantiene sin agitación, por lo que las burbujas ascienden sólo por flotación. El sistema se mantiene a 30 °C y 1 atm. La densidad y viscosidad del líquido son, respectivamente, 1.15 g/cm<sup>3</sup> y 3.3 cP. El oxígeno es sólo ligeramente soluble en el medio de cultivo (se puede asumir sistema diluido) y su difusividad en el líquido es  $2.1 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/s. Estimar el valor del coeficiente de transferencia de masa  $k_L$ .

$$\text{RESPUESTA: } 7.66 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

**EJERCICIO 14** (12 puntos, fecha límite 18-NOV-2021)

Para llevar a cabo una reacción enzimática, se ha inmovilizado una enzima en el interior de partículas esféricas sólidas de 5 mm de diámetro, que se empacaron formando un lecho fijo en un tubo de 6 plg de diámetro interno. A través del lecho se hace pasar una solución del sustrato, con un flujo volumétrico de 33 LPM. La densidad y viscosidad de la solución son 1.05 g/cm<sup>3</sup> y  $1.2 \times 10^{-3}$  Pa·s, respectivamente, y el coeficiente de difusión del sustrato en la solución es  $7 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s. Estimar el valor del coeficiente de transferencia de masa para el soluto, de la solución a la superficie de las partículas del lecho.

$$\text{RESPUESTA: } 3.274 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

**EJERCICIO 15** (8 puntos, fecha límite 26-NOV-2021)

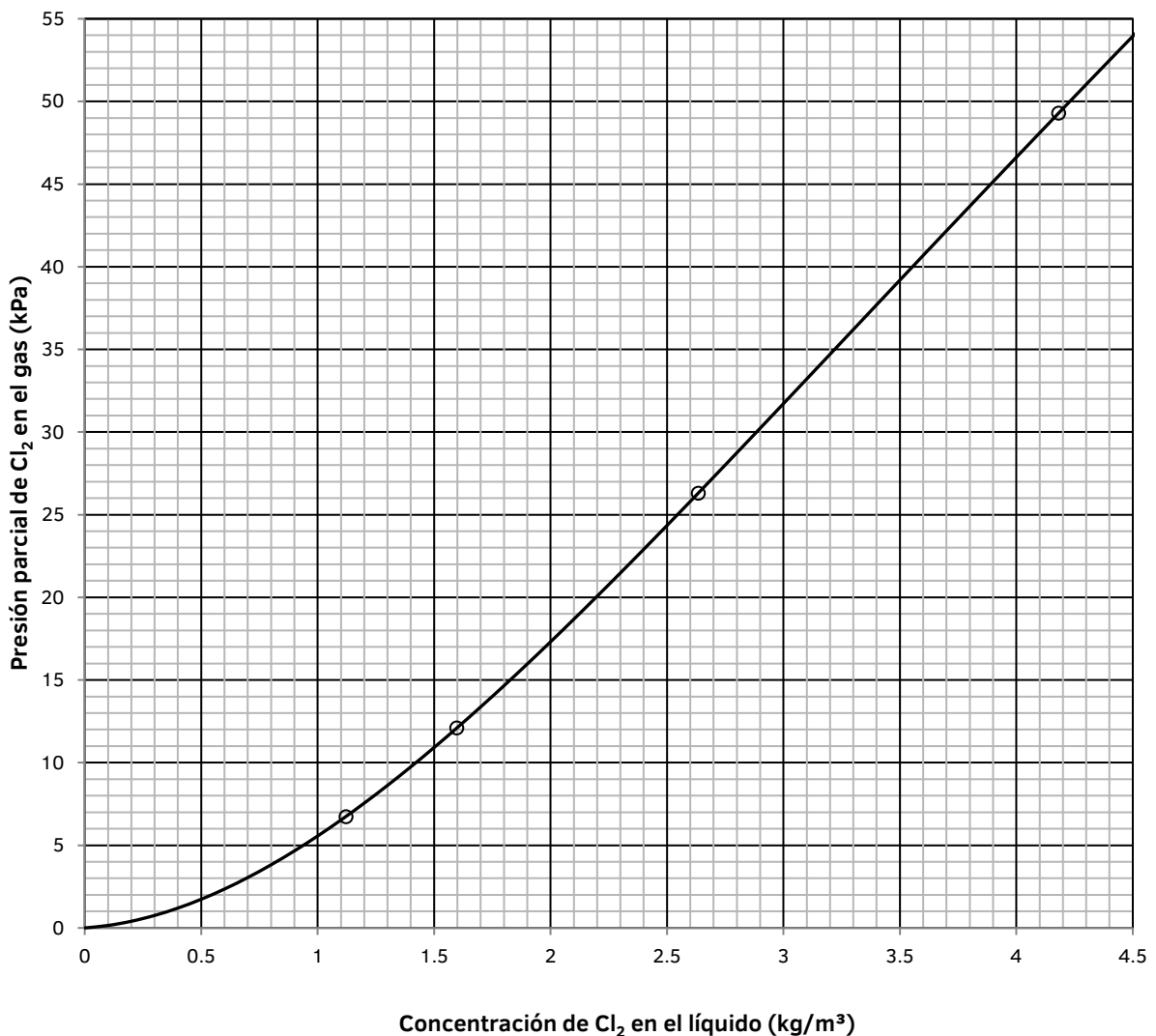
El agua clorada que se utiliza para blanquear la pulpa de papel se prepara por absorción de  $\text{Cl}_2$  en agua. En ciertas condiciones de operación en el sistema, la presión parcial de cloro en la fase gaseosa es de 47 kPa y la concentración de cloro en el líquido es  $0.2 \text{ kg/m}^3$ . El coeficiente global de transferencia de masa para el líquido es  $3.16 \text{ m/h}$  y el 20% de la resistencia a la transferencia de masa se presenta en la fase líquida. Para este caso, determinar lo siguiente:

- (A) los coeficientes individuales de transferencia de masa (en  $\text{kg/kPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}$  y  $\text{m/h}$ , respectivamente).
- (B) las condiciones de la interfase (en kPa y  $\text{kg/m}^3$ , respectivamente).
- (C) la densidad de flujo de transferencia de masa del cloro (en  $\text{kg/m}^2\cdot\text{h}$ ).

Los datos disponibles para el equilibrio de cloro gaseoso con agua a 293 K (la temperatura de operación del equipo) se muestran en la tabla y en la gráfica:

|   |      |      |      |      |      |
|---|------|------|------|------|------|
| Presión parcial de cloro (kPa)            | 6.74 | 12.1 | 26.3 | 49.3 | 97.7 |
| Solubilidad del cloro ( $\text{kg/m}^3$ ) | 1.12 | 1.60 | 2.63 | 4.18 | 7.25 |

Datos adaptados de Welty, Wilson y Wicks, "Fundamentos de Transferencia de Momentum, Calor y Masa", Limusa.



RESPUESTA: (A)  $0.288 \text{ kg/kPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}$ ,  $15.8 \text{ m/h}$ , (B)  $P_{A,i} = 5 \text{ kPa}$ ,  $C_{A,i} = 0.966 \text{ kg/m}^3$ , (C)  $n_A = 12.1 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$

**EJERCICIO 16** (12 puntos, fecha límite 29-NOV-2021)

Se utiliza un equipo de absorción para transferir un componente A desde el aire a un solvente líquido. En un punto determinado del equipo, la presión parcial de A en la corriente de gas es 0.21 atm y la concentración de A en la corriente del líquido es  $6.24 \times 10^{-5}$  lbmol/ft<sup>3</sup>. En esa misma parte del equipo, la rapidez de transferencia de masa de A entre el gas y el líquido es 0.0295 lbmol/ft<sup>2</sup>·h. El coeficiente individual de transferencia de masa para el gas es 0.295 lbmol/atm·ft<sup>2</sup>·h. En el intervalo de presiones y composiciones de interés, la línea de equilibrio (determinada por separado) es esencialmente recta,  $P_A = mC_A$ , con pendiente  $m = 1280$  atm·ft<sup>3</sup>/lbmol.

(A) Completar los valores correspondientes en la siguiente tabla:

| coeficiente de transferencia de masa | diferencia de composición que impulsa la transferencia |
|--------------------------------------|--|
| $k_G =$                              | $P_{A,G} - P_{A,i} =$                                  |
| $k_L =$                              | $C_{A,i} - C_{A,L} =$                                  |
| $K_G =$                              | $P_{A,G} - P_A^* =$                                    |
| $K_L =$                              | $C_A^* - C_{A,L} =$                                    |

(B) ¿Qué porcentaje de la resistencia total a la transferencia de masa corresponde a la película de gas?

RESPUESTA: (B) 76.8%

## Unidad 3 – Absorción

**EJERCICIO 17** (6 puntos, fecha límite 07-DIC-2021)

Adaptado de Treybal (1980) "Operaciones de Transferencia de Masa", 2ª edición, McGraw-Hill.

Se utiliza una columna de absorción para recuperar el dióxido de carbono de una corriente gaseosa, con un flujo de 1265 m<sup>3</sup>/h medidos a 125 kPa y 25 °C, que contiene un 14% volumen de CO<sub>2</sub>. El gas de salida contiene 1.2% volumen de CO<sub>2</sub>. El solvente utilizado (etanolamina en solución acuosa, con un peso molecular promedio de 22.8 g/mol) se encuentra esencialmente libre de CO<sub>2</sub> y se alimenta en contracorriente a razón de 0.9 kg/s. Calcular (A) el flujo molar del gas alimentado, (B) el flujo molar del acarreador, (C) la cantidad de CO<sub>2</sub> transferido en kmol/h, (D) el porcentaje molar de CO<sub>2</sub> en el líquido de salida, y (E) la relación molar de CO<sub>2</sub> en base libre de soluto en el líquido de salida.

RESPUESTA: (A) 63.79 kmol/h, (B) 54.86 kmol/h, (C) 8.264 kmol/h, (D) 5.5%, (E) 0.0582 kmol CO<sub>2</sub>/kmol solvente

**EJERCICIO 18** (12 puntos, fecha límite 08-DIC-2021)

Adaptado de Geankoplis et al. (2018) "Transport Processes and Separation Process Principles", 5ª edición, Prentice Hall International.

Una corriente gaseosa de 95.8 kmol/h proveniente de un reactor, conteniendo 55% mol de amoníaco (NH<sub>3</sub>) y 45% mol de gases inertes, se alimenta a una columna de absorción a contracorriente, donde se reduce el contenido de NH<sub>3</sub> a 5%. A la columna se alimenta agua conteniendo 0.5% mol NH<sub>3</sub>. La columna de absorción opera a 30 °C y 1 atm. (A) ¿Cuál es el flujo molar de acarreador en base libre de soluto? (B) ¿Cuál es el flujo mínimo de solvente, en base libre de soluto? (C) ¿Cuál es el porcentaje de NH<sub>3</sub> en el líquido de salida, si se utiliza 1.2 veces el flujo mínimo de solvente? Incluir en su evidencia el diagrama de equilibrio en base libre de soluto (X,Y) donde se haya trazado la línea de operación para los incisos (B) y (C).

|   |   |        |        |        |       |       |      |       |
|---|---|--------|--------|--------|-------|-------|------|-------|
| fracción mol de NH <sub>3</sub> en el líquido       | 0 | 0.0126 | 0.0405 | 0.0737 | 0.137 | 0.175 | 0.21 | 0.241 |
| presión parcial de NH <sub>3</sub> en el gas (mmHg) | 0 | 11.5   | 40.1   | 79.7   | 179   | 260   | 352  | 454   |

RESPUESTA: (A) 43.11 kmol/h, (B) 172.07 kmol/h, (C) 19.9%

**EJERCICIO 19** (16 puntos, fecha límite 10-DIC-2021)

Adaptado de Treybal (1980).

Se desea remover el vapor de benceno de una corriente de nitrógeno, absorbiéndolo a contracorriente en queroseno en una torre empacada. El gas que se alimenta a la columna tiene un flujo de  $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $2.1 \text{ bar}$ , y contiene 7% de benceno (en volumen). El gas que sale es esencialmente nitrógeno puro. El queroseno tiene una densidad de  $800 \text{ kg}/\text{m}^3$  y una viscosidad de  $2.3 \text{ cP}$  (propiedades que no varían al absorberse el benceno) y se alimenta a razón de  $4 \text{ kg}/\text{s}$ . La columna va a estar empacada con anillos Pall de metal de 2 pulgadas, y va a operar a la misma temperatura y presión que el gas de entrada. Determinar qué diámetro debe tener la columna para operar con una caída de presión del gas de  $400 \text{ Pa}/\text{m}$ .

RESPUESTA: 1.2 m

**EJERCICIO 20** (10 puntos, fecha límite 13-DIC-2021)

Adaptado en parte de Chopey (2003) "Handbook of Chemical Engineering Calculations", McGraw-Hill.

Se va a utilizar una columna empacada para remover el amoniaco de una corriente de aire (2% volumen de amoniaco) empleando agua. Los flujos de alimentación son  $11.64 \text{ m}^3/\text{s}$  del gas (medido a las condiciones de operación de la columna,  $26 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $1 \text{ atm}$ ) y  $700 \text{ LPM}$  del agua. El gas debe salir con una concentración de amoniaco de 70 partes por millón (en volumen). El sistema se puede asumir diluido, con factor de absorción constante. La línea de equilibrio está descrita por la ecuación  $y = 1.06x$ , donde  $x$  y  $y$  son las fracciones mol de amoniaco en el agua y en el aire, respectivamente. Para el empaque utilizado en la columna, el fabricante reporta que la altura equivalente a una etapa teórica es  $0.75 \text{ m}$ . Determinar la altura de empaque que se necesita en la columna.

RESPUESTA: 13.5 m

## Unidad 4 – Adsorción e intercambio iónico

**EJERCICIO 21** (16 puntos, fecha límite 17-DIC-2021)

Adaptado de Geankoplis et al., "Transport Processes and Separation Process Principles", 5th edition, Prentice Hall.

Los siguientes datos de equilibrio se obtuvieron para glucosa en solución acuosa adsorbiéndose en alúmina activada. Determinar la isoterma (lineal, de Freundlich o de Langmuir) que mejor concuerde con los datos, en las unidades dadas.

|                                     |        |        |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $C \text{ (g}/\text{cm}^3\text{)}$  | 0.0040 | 0.0087 | 0.019 | 0.027 | 0.061 | 0.094 | 0.195 |
| $q \text{ (g soluto/g adsorbente)}$ | 0.026  | 0.053  | 0.075 | 0.082 | 0.113 | 0.123 | 0.129 |

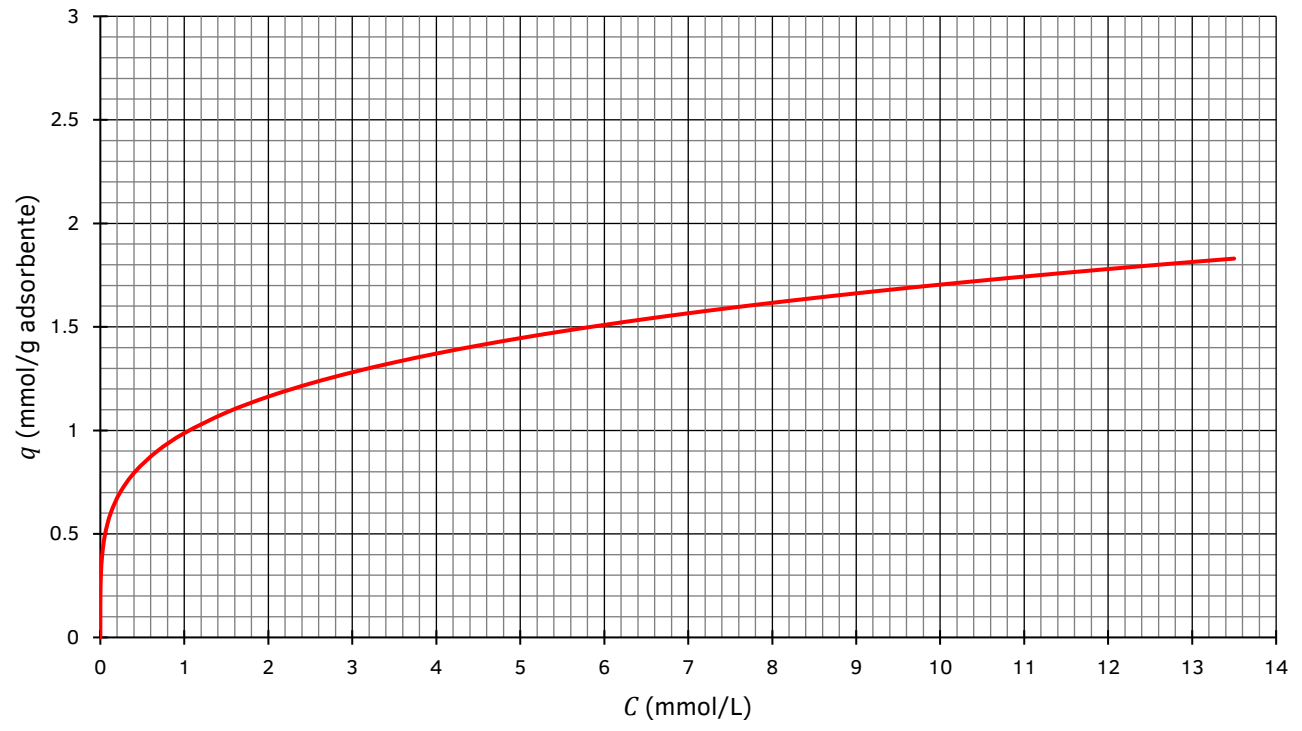
$$\text{RESPUESTA: } q = \frac{0.147C}{0.0182 + C}$$

**EJERCICIO 22** (24 puntos, fecha límite 10-ENE-2021)Constantes para la isoterma de adsorción tomadas de las *International Critical Tables*, tomo III.

El Gran Jefe le ha pedido a dos integrantes de su equipo de trabajo (Angélica Santos y Lucy Fernández) que se encarguen del tratamiento de 200 litros de acetona que contiene ácido pícrico (2,4,6-trinitrofenol,  $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{OH}$ ) a una concentración de  $12.9 \text{ mmol}/\text{L}$ . Para ello, disponen de  $2.5 \text{ kg}$  de carbón activado, y saben que la isoterma de adsorción del ácido pícrico en estas condiciones está dada por  $q = 0.9867C^{0.2373}$ , donde  $C$  es la concentración de ácido pícrico en solución,  $\text{mmol}/\text{L}$ , y  $q$  es la cantidad en equilibrio de ácido pícrico adsorbido,  $\text{mmol}/\text{g}$  de adsorbente.

“¡Échase todo!”, dijo Lucy, refiriéndose al carbón activado. Pero Angélica opinó: “de hecho, lograríamos mejor remoción si dividimos el carbón activado en dos partes iguales, le agregamos una primero, que alcance el equilibrio, lo removemos, y repetimos con la otra mitad del carbón”. “Así es más tardado”, replicó Lucy, “mi propuesta es más fácil, acabamos pronto y nos vamos a festejar...”

Para saber quién tiene razón, determinar la concentración final de ácido pícrico en la acetona, si la adsorción se realiza **(A)** en una sola etapa usando los  $2.5 \text{ kg}$  de carbón activado, o **(B)** en dos etapas, usando  $1.25 \text{ kg}$  de carbón activado en cada etapa. El volumen de la solución puede asumirse constante.



RESPUESTA: (A) 0.9 mmol/L, (B) 0.1 mmol/L  
(Angélica tenía razón)