

1. Datos Generales de la asignatura

Nombre de la asignatura:	Operaciones Unitarias II
Clave de la asignatura:	BQJ-1018
SATCA¹:	4-2-6
Carrera:	Ingeniería Bioquímica

2. Presentación

Caracterización de la asignatura

Los fenómenos de transporte consisten en la caracterización a nivel microscópico o diferencial en el interior de los sistemas, con lo que se consigue así una concepción integral de la Ingeniería Bioquímica en la medida en que se relaciona el comportamiento macroscópico de las operaciones unitarias con el comportamiento a nivel microscópico y molecular de las sustancias o componentes de la operación unitaria, como se requiere en el estudio del secado de productos biológicos, esterilización de alimentos, destilación, absorción de gases, etc. Esta concepción también ha sido incorporada a los procesos con reacción química o biológica, en donde el fenómeno de transporte (por ser la mayoría de las veces un proceso *lento*) afecta sustancialmente a la eficiencia de los biorreactores, principalmente en los que son de naturaleza multifásica como la fermentación en estado sólido, la biofiltración, fermentación sumergida con inmovilización de microorganismos o enzimas, biorreactores de membrana, de burbujeo, de lecho fijo de flujo ascendente, entre muchos otros.

Los principales balances microscópicos en la Ingeniería Bioquímica son los de cantidad de movimiento o momentum, calor y masa que permiten caracterizar la variación de la fuerza motriz asociada (gradientes de velocidades, temperaturas o de concentraciones, respectivamente) con respecto a coordenadas espaciales y al tiempo en los problemas dinámicos. La rapidez del flux (valor de Ψ) está determinada por los parámetros de transporte asociados a cada tipo de transferencia: viscosidad o parámetros reológicos para el transporte de cantidad de movimiento; conductividad térmica, coeficiente de transferencia de calor por convección y emisividad para el transporte de calor; difusividad y coeficiente convectivo de transferencia masa para el transporte de masa para una sustancia o componente *A* en sistemas binarios o multicomponentes.

En el caso de la transferencia de masa que es el área de estudio de esta asignatura, se continúa realizando balances microscópicos de calor y de masa aplicando la metodología planteada en la asignatura de Fenómenos de Transporte I. En este caso, se estudia el transporte molecular (difusión) y el transporte asociado al movimiento global de un fluido (convección) considerando en su caso la generación de masa por reacción

¹ Sistema de Asignación y Transferencia de Créditos Académicos

química En síntesis, la asignatura de Operaciones Unitarias II:

- Permite establecer los fundamentos para diseñar, seleccionar, adaptar, operar, simular, optimizar y escalar equipos y procesos en los que se utilicen de manera sostenible los recursos naturales.
- Proporciona las herramientas para tener una descripción fenomenológica basada en leyes y principios de la Ingeniería, para efectuar el diseño de equipos para la industria así como la comprensión del efecto de los fenómenos de transporte en la operación eficiente de los equipos.

Intención didáctica

El primer tema explica las características y modelación del transporte de masa por trayectoria molecular o difusional de un componente en un sistema binario (que posteriormente se puede extrapolar a sistemas multicomponentes). La deducción de la ley de Fick con la aparición de la difusividad (D_{AB}). La modelación rigurosa de este parámetro de transporte es muy compleja por lo que se recurre a métodos experimentales y al uso de correlaciones (Ver referencia 12). A partir del balance de masa para el componente A en un elemento diferencial se analizan diversos problemas clásicos (difusión en una placa rectangular, difusión y reacción en diversas geometrías, difusión en un gas estancado, contradifusión, etc.), para obtener perfiles de concentración, concentraciones promedio y flujos másicos transferidos. A partir del balance de masa en un elemento diferencial cartesiano sin restricciones, se obtiene la ecuación general del balance microscópico de masa que será útil para abordar problemas más complejos. El estado dinámico (utilización de la ecuación de difusión también conocida como segunda ley de Fick) se puede resolver por estrategias similares a las de la unidad 1. El fenómeno difusión-reacción es esencial para comprender el mecanismo de reacciones heterogéneas típicas de la Ingeniería Bioquímica (Biofiltración, producción de celulasas por *Rhizopus nigricans* con micelio aglomerado (pellets), tratamiento de aguas residuales con biopelículas, etc), por lo que se estudia el módulo de Thiele y el factor de efectividad.

En el segundo tema se analiza la segunda forma de transferencia de masa que es la convectiva, por lo que se requiere comprender la deducción de una ley análoga a la ley de Enfriamiento de Newton, que se conoce como ecuación de transferencia convectiva de masa que requiere de especificar un parámetro de transporte conocido como coeficiente convectivo de transferencia de masa (k_c), cuya estimación también requiere de mediciones de laboratorio junto con el análisis dimensional y el uso de correlaciones para diversos sistemas geométricos y regímenes de flujo. En este punto es importante que el estudiante reconozca que la caracterización de los bioprocesos muchas de las veces, requiere la inclusión de dos o tres fenómenos de transporte de manera acoplada, por lo que, para establecer un nivel inicial de sofisticación para su análisis matemático, es necesario definir el fenómeno de transporte más importante.

El tercer tema se dedica a la Absorción de gases en líquidos. Con lo que se llega a la aplicación de los conceptos de transferencia de masa en la Operación Unitaria por excelencia y más objetiva de esta área. En este tema se aplican los coeficientes de

transferencia de masa globales e individuales para el cálculo de columnas de absorción por etapas y empacadas mediante procedimientos gráficos y numéricos.

El cuarto tema se dedica a Adsorción Esta es una operación que se caracteriza por la transferencia de masa de un soluto en un fluido por su deposición en un sólido poroso; en ocasiones el soluto a separar es un componente valioso que se desea recuperar y en otras un contaminante del fluido que se desea eliminar. El intercambio iónico consiste en la transferencia de un ión no deseable contenido en un fluido a una resina iónica que proporciona un ión más apropiado.

3. Participantes en el diseño y seguimiento curricular del programa

Lugar y fecha de elaboración o revisión	Participantes	Evento
Instituto Tecnológico de Villahermosa del 7 al 11 de septiembre de 2009.	Representantes de los Institutos Tecnológicos de: Celaya, Culiacán, Durango, Mérida, Morelia, Tehuacán, Tepic, Tijuana, Tuxtepec, Veracruz y Villahermosa.	Reunión Nacional de Diseño e Innovación Curricular para el Desarrollo y Formación de Competencias Profesionales de las Carreras de Ingeniería Ambiental, Ingeniería Bioquímica, Ingeniería Química e Ingeniería en Industrias Alimentarias.
Instituto Tecnológico de Celaya del 8 al 12 de febrero de 2010.	Representantes de los Institutos Tecnológicos de: Celaya, Culiacán, Durango, Mérida, Morelia, Tehuacán, Tijuana, Tuxtepec, Veracruz y Villahermosa.	Reunión Nacional de Consolidación de los Programas en Competencias Profesionales de Carreras de Ingeniería Ambiental, Ingeniería Bioquímica, Ingeniería Química e Ingeniería en Industrias Alimentarias.
Instituto Tecnológico de Villahermosa, del 19 al 22 de marzo de 2013.	Representantes de los Institutos Tecnológicos de: Acayucan, Calkiní, Celaya, Colima, Culiacán, Durango, Irapuato, La Paz, La Región Sierra, Los Ríos, Mazatlán, Mérida, Misantra, Morelia, Tijuana, Tuxtepec, Tuxtla Gutiérrez, Veracruz, Villahermosa.	Reunión Nacional de Seguimiento Curricular de las carreras de Ingeniería Ambiental, Ingeniería Bioquímica, Ingeniería en Industrias Alimentarias e Ingeniería Química, del SNIT.

4. Competencia(s) a desarrollar

Competencia(s) específica(s) de la asignatura
<ul style="list-style-type: none"> • Diseña y selecciona equipos que involucran la transferencia de masa en los procesos de estudio de esta materia, es decir, absorción y adsorción. • Deduce y utiliza las ecuaciones de los balances microscópicos de masa para un componente A en diversos sistemas gobernados por esta transferencia. • Reconoce que el estudio de los fenómenos de transporte es fundamental para el diseño de procesos.

5. Competencias previas

<ul style="list-style-type: none"> • Aplicar la primera Ley de la Termodinámica. • Realizar balances macroscópicos de materia y energía • Uso e interpretación de diagramas de equilibrio • Uso de tabla de datos termodinámicos • Aplicación de propiedades coligativas de las soluciones • Solución numérica de sistemas de ecuaciones lineales y no lineales. • Solución numérica de matrices e integrales.

6. Temario

No.	Temas	Subtemas
1	Fundamentos de Transferencia de Masa	1.1 Conceptos de velocidad media másica y molar de una mezcla múltiple y binaria. Flujo difusional. 1.2 Ley de Fick. Difusividad. 1.3 Estimación de la difusividad para sistemas binarios gaseosos y líquidos. 1.4 Deducción de la ecuación general de balance microscópico de masa para una mezcla binaria. 1.5 Difusión de un líquido volátil en un gas estancado. 1.6 Contradifusión molecular.
2	Transferencia de masa por convección.	2.1. Transferencia de masa en la Interfase. 2.2. Coeficiente de transferencia de masa, medición y estimación. 2.3. Analogías para estimar k_c : Reynolds, Chilton-Colburn, factores JH y JD. 2.4. Transporte de masa en medios porosos y multifásicos. Coeficiente volumétrico de transferencia de masa k_{la} 2.5 Teoría de la doble película.

		<p>2.5.1. Leyes de Charles, Raoult y Henry.</p> <p>2.5.2 El coeficiente global de transferencia de masa para la fase líquida y gaseosa.</p> <p>2.5.3 Relación entre los coeficientes globales y los individuales.</p> <p>2.5. Introducción a los procesos acoplados en la ingeniería Bioquímica.</p>
3	Absorción.	<p>3.1. Concepto e importancia de la absorción.</p> <p>3.2. Tipos de columnas de absorción.</p> <p>3.3. Tipos de empaques para absorción.</p> <p>3.4. Diseño de torres de absorción en columnas empacadas para mezclas binarias.</p> <p>3.5. Diseño de torres de absorción en columnas de platos.</p> <p>3.5.1. Para mezclas binarias.</p> <p>3.5.2. Para mezclas multicomponentes.</p>
4	Adsorción e Intercambio Iónico.	<p>4.1. Adsorción.</p> <p>4.1.1. Fundamentos de adsorción (equilibrio de adsorción, Velocidades de adsorción).</p> <p>4.1.2. Ecuaciones de balance-materia.</p> <p>4.1.3. Diseño de un adsorbedor de lecho fijo.</p> <p>4.2. Intercambio iónico.</p> <p>4.2.1. Isotermas de sorción de intercambio</p> <p>4.2.2. Método para el diseño de la columna de intercambio iónico.</p>

7. Actividades de aprendizaje de los temas

Fundamentos de Transferencia de Masa	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica(s):</p> <p>Comprende los principios del balance microscópico de masa por difusión molecular y aplicarlos para la estimación de perfiles de concentración en diversos problemas de ingeniería.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Explicar la difusión molecular y la ley de Fick, usando videos o animaciones, Reflexionar sobre la conveniencia de explicar el transporte de masa con este modelo, en lugar de la simulación a nivel molecular. • Explicar el concepto de difusividad en mezclas binarias (coeficiente de difusión binario) y describir el

<p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de análisis y síntesis • Capacidad de organizar y planificar • Comunicación oral y escrita • Manejo de software como hoja electrónica y lenguajes de programación • Habilidad para buscar y analizar información proveniente de fuentes diversas (Gestión de la información) • Solución de problemas • Toma de decisiones en diversas circunstancias, inclusive adversas. • Capacidad crítica y autocrítica • Trabajo en equipo • Habilidades interpersonales • Trabajo con ética y sustentabilidad. • Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica • Habilidades de investigación • Capacidad de aprender • Capacidad de generar nuevas ideas (creatividad) • Habilidad para trabajar en forma autónoma • Búsqueda permanente del logro • Habilidad para el autoaprendizaje cuando sea necesario. • Preocupación por la calidad 	<p>efecto de la presión y la temperatura sobre la difusividad en gases, líquidos y sólidos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Calcular la difusividad de gases y líquidos mediante correlaciones generalizadas y comparar su grado de predictibilidad y sus rangos de validez • Explicar el concepto de difusividad efectiva de una sustancia en un medio multifásico (medio poroso). • Explicar la convección natural de masa inducida por altas concentraciones de un soluto. • Deducir el balance microscópico de masa para un componente A y explicar el significado físico de los términos involucrados en las ecuaciones generales de cambio. • Calcular a partir de un balance de masa, el flujo difusivo de masa unidireccional, en estado estable y dinámico, a través de medios homogéneos o heterogéneos (difusividad efectiva); en geometrías rectangulares, cilíndricas o esféricas, con y sin reacción química, empleando condiciones de frontera de Dirichlet, Neumann o Robin. • Diseñar gráficas o animaciones para explicar el transporte de masa difusivo en estado dinámico 1-D o en estado permanente en 2-D. Comparar soluciones analíticas con numéricas
<p>Transferencia de Masa por Convección</p>	
<p>Competencias</p>	<p>Actividades de aprendizaje</p>
<p>Específica(s):</p> <p>Comprende los principios del balance microscópico de masa convectivo y aplicarlos para la estimación de perfiles de concentración en diversos problemas de ingeniería.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Experimento y condiciones para la transferencia de masa en la interfaz. Teoría de película y ecuación de transferencia de masa (analogía con la ley de enfriamiento de Newton) • Explicar la convección natural de masa inducida por altas

<p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de análisis y síntesis • Capacidad de organizar y planificar • Comunicación oral y escrita • Manejo de software como hoja electrónica y lenguajes de programación • Habilidad para buscar y analizar información proveniente de fuentes diversas (Gestión de la información) • Solución de problemas • Toma de decisiones en diversas circunstancias, inclusive adversas. • Capacidad crítica y autocrítica • Trabajo en equipo • Habilidades interpersonales • Trabajo con ética y sustentabilidad. • Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica • Habilidades de investigación • Capacidad de aprender • Capacidad de generar nuevas ideas (creatividad) • Habilidad para trabajar en forma autónoma • Búsqueda permanente del logro • Habilidad para el autoaprendizaje cuando sea necesario. • Preocupación por la calidad 	<p>concentraciones de un soluto.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Explicar la convección forzada de masa y el coeficiente de transferencia de masa. • Estimar los coeficientes de transferencia de masa local y promedio a partir de correlaciones y analogías entre las transferencias de momentum, calor y masa (analogías de Reynolds y de Chilton-Colburn). • Obtener los números adimensionales característicos de los problemas de transferencia de masa mediante el análisis dimensional de la ecuación de balance microscópico. • Describir el significado físico de los principales números adimensionales de la transferencia de masa (números de Reynolds, Grashoff de masa, Schmidt, Péclet de masa, Fourier de masa, Sherwood, Nusselt de masa, Biot de masa, Damköhler, Lewis, Stanton de masa, módulo de Thiele, factor j_D). • En seminario, explicar las ventajas de caracterizar sistemas multifásicos usando un coeficiente volumétrico de masa (k_{la}). Aplicaciones en el diseño de biorreactores. • Realizar un seminario, en donde se describan y propongan los modelos matemáticos de diversas operaciones unitarias en donde ocurren fenómenos acoplados como es el caso del secado, dinámica de cámaras frigoríficas y hornos, almacenamiento de granos, biorreactores con microorganismos o enzimas inmovilizadas, entre otros. Apoyarse con artículos científicos <i>ad hoc</i> .
---	--

Absorción.	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica(s):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Construye e interpreta curvas de equilibrio de sistemas gas-líquido experimentales. • Calcula los coeficientes generales de transferencia de masa en sistemas gas-líquido. • Calcula la altura y el número de unidades de transferencia en fase gaseosa y líquida en una torre de absorción. • Diseña torres de absorción en columnas empacadas y en columnas de platos. <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de análisis y síntesis • Capacidad de organizar y planificar • Comunicación oral y escrita • Manejo de software como hoja electrónica y lenguajes de programación • Habilidad para buscar y analizar información proveniente de fuentes diversas (Gestión de la información) • Solución de problemas • Toma de decisiones en diversas circunstancias, inclusive adversas. • Capacidad crítica y autocrítica • Trabajo en equipo • Habilidades interpersonales • Trabajo con ética y sustentabilidad. • Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica • Habilidades de investigación • Capacidad de aprender • Capacidad de generar nuevas ideas (creatividad) 	<ul style="list-style-type: none"> • Investigar y discutir en clases los diferentes conceptos existentes en la literatura acerca de la absorción. • Investigar los diferentes tipos de absorción que existen y explicarlos en una discusión grupal. • Exponer con diapositivas los diferentes tipos de platos y materiales con que están construidos las torres de absorción. • Investigar el concepto de equilibrio gas-líquido de una mezcla binaria y discutir en grupo la generación de dichas curvas con diferentes mezclas binarias obtenidas de literatura. • Desarrollar los balances de materia establecidos para una columna de absorción por platos o empacada. • Establecer las ecuaciones y aplicarlas para el cálculo de los coeficientes de transferencia de masa en la fase líquida y gaseosa en una columna de absorción. • Establecer las ecuaciones y aplicarlas para el cálculo de la altura y el número de unidades de transferencia en fase gaseosa y líquida en una torre de absorción. • Aplicar las curvas de equilibrio gas-líquido en el cálculo de platos teóricos de una columna de absorción. • Conocer y emplear un simulador comercial para el diseño, análisis y selección de columnas de absorción. <p>1. Realizar prácticas de laboratorio para que se conozcan las partes de una columna de absorción y sus principales variables de operación, estableciendo la discusión de resultados y obtención de</p>

<ul style="list-style-type: none"> • Habilidad para trabajar en forma autónoma • Búsqueda permanente del logro • Habilidad para el autoaprendizaje cuando sea necesario. • Preocupación por la calidad 	<p>conclusiones por equipo de trabajo.</p>
<p>Adsorción.</p>	
<p>Competencias</p>	<p>Actividades de aprendizaje</p>
<p>Específica(s):</p> <p>Comprende los conceptos del fenómeno de adsorción e intercambio iónico y aplicarlos en la selección de los equipos utilizados y determinar las condiciones de operación.</p> <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de análisis y síntesis • Capacidad de organizar y planificar • Comunicación oral y escrita • Manejo de software como hoja electrónica y lenguajes de programación • Habilidad para buscar y analizar información proveniente de fuentes diversas (Gestión de la información) • Solución de problemas • Toma de decisiones en diversas circunstancias, inclusive adversas. • Capacidad crítica y autocrítica • Trabajo en equipo • Habilidades interpersonales • Trabajo con ética y sustentabilidad. • Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica • Habilidades de investigación • Capacidad de aprender • Capacidad de generar nuevas ideas (creatividad) • Habilidad para trabajar en forma autónoma • Búsqueda permanente del logro 	<ul style="list-style-type: none"> • Revisa las aplicaciones del fenómeno de Adsorción • Identificar los diferentes tipos de adsorbentes y sus características • Aplicar los principios de balance de materia en el diseño de equipo de adsorción • Resolver problemas de columnas de adsorción en lecho estático y en lecho fluidizado. • Seleccionar columnas de adsorción. • Aplicar los fundamentos del intercambio iónico en el diseño de equipo que involucra este fenómeno. • Utilizar técnicas computacionales y software, como apoyo en la solución de problemas para ambas operaciones

<ul style="list-style-type: none"> • Habilidad para el autoaprendizaje cuando sea necesario. • Preocupación por la calidad 	
--	--

8. Práctica(s)

<ul style="list-style-type: none"> • Medición de la difusividad en un sistema sólido-líquido, gas-gas. • Utilización de software (MathCad, Excel, Slicer Dicer, Tecplot, COMSOL mutiphysics, software CFD, programas locales, entre otros) para la solución computacional y visualización de resultados. • Simulación del efecto difusión-reacción en un microorganismo inmovilizado en un soporte orgánico, usando Excel y cálculo del módulo de Thiele y factor de efectividad. • Absorción de anhídrido carbónico del aire. • Determinar la velocidad de absorción de oxígeno en agua en un tanque agitado por el método del sulfito.

9. Proyecto de asignatura

El objetivo del proyecto que planteé el docente que imparta esta asignatura, es demostrar el desarrollo y alcance de la(s) competencia(s) de la asignatura, considerando las siguientes fases:

- **Fundamentación:** marco referencial (teórico, conceptual, contextual, legal) en el cual se fundamenta el proyecto de acuerdo con un diagnóstico realizado, mismo que permite a los estudiantes lograr la comprensión de la realidad o situación objeto de estudio para definir un proceso de intervención o hacer el diseño de un modelo.
- **Planeación:** con base en el diagnóstico en esta fase se realiza el diseño del proyecto por parte de los estudiantes con asesoría del docente; implica planificar un proceso: de intervención empresarial, social o comunitario, el diseño de un modelo, entre otros, según el tipo de proyecto, las actividades a realizar los recursos requeridos y el cronograma de trabajo.
- **Ejecución:** consiste en el desarrollo de la planeación del proyecto realizada por parte de los estudiantes con asesoría del docente, es decir en la intervención (social, empresarial), o construcción del modelo propuesto según el tipo de proyecto, es la fase de mayor duración que implica el desempeño de las competencias genéricas y específicas a desarrollar.
- **Evaluación:** es la fase final que aplica un juicio de valor en el contexto laboral-profesión, social e investigativo, ésta se debe realizar a través del reconocimiento de logros y aspectos a mejorar se estará promoviendo el concepto de “evaluación para la mejora continua”, la metacognición, el desarrollo del pensamiento crítico y reflexivo en los estudiantes.

10. Evaluación por competencias

Son las técnicas, instrumentos y herramientas sugeridas para constatar los desempeños académicos de las actividades de aprendizaje.

- Trabajos de investigación en donde se evalúa la calidad del contenido, pertinencia y presentación del mismo, de preferencia en formato digital.
- Exámenes dentro y fuera del aula. Algunos de los exámenes pueden ser con consulta de material bibliográfico y uso de computadora, para apreciar la capacidad del estudiante para búsqueda e integración de información específica.
- Participación del estudiante durante el desarrollo del curso.
- Sesiones de preguntas y respuestas profesor-estudiante, estudiante-estudiante.
- Seminarios de temas selectos impartidos por los estudiantes
- Presentación y defensa de un proyecto propio de la asignatura.
- Talleres de resolución de problemas por equipos de trabajo.
- Planteamiento de problemas selectos cuya resolución (opcional) acreditará puntos extra a la evaluación en turno.

11. Fuentes de información

1. Bird, R. B., Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot. *Transport Phenomena*, 2nd edition. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2002.
2. Brodkey Robert S., Hershey Harry C. *Transport Phenomena: A Unified Approach*. USA: Mc. Graw-Hill. 1988.
3. Geankoplis, C.J. *Transport Processes and Separation Process Principles. Fourth USA: Prentice Hall PTR. 2003.*
4. Hines, A. L., Maddox, R.N. *Transferencia de Masa: Fundamentos y Aplicaciones*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana S.A. 1987.
5. Incropera, F. P., DeWitt, D.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5th Edition*. John Wiley & Sons Inc. 2002.
6. Kreyszig, E. *Advanced Engineering Mathematics*. 9th edition. John Wiley and Sons Inc. International Edition. Singapore. 2006.
7. Lobo, R. *Principios de Transferencia de Masa*. México: Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.. 1997.
8. McCabe, W., Smith, J., Harriott, P. *Unit Operations of Chemical Engineering*. 7th edition. Mc Graw-Hill Book Co. 2004.
9. Ochoa-Tapia, A. *Métodos Matemáticos Aplicados a la Ingeniería Química*. Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica. UAM-Iztapalapa. 2004.
10. Poling, B. Prausnitz, J, M., O'Connell, J.O. *The Properties of Gases and Liquids*. Fifth edition. USA: Mc. Graw-Hill Professional.. 2000.
11. Richard G. Rice, Duong D. Do. *Applied Mathematics and Modeling for Chemical Engineers*. John Wiley & Sons, Inc. 1995.
12. Spiegel, M.R. *Manual de Fórmulas y Tablas de Matemática Aplicada*. 3ª edición. McGraw-Hill Book. Co. México. 2005.
13. Treybal Robert E., *Operaciones de Transferencia de Masa* 2a. ed. México Mc.Graw-Hill. 1988.

14. Welty, J., C.E. Wicks, R. E. Wilson, G. L. Rorrer. *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*. 4th edition. John Wiley & Sons. Inc. 2001.
15. Welty, J., Wicks, C.E., Wilson, R.E., Rorrer, G.L. *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*. 5th edition. John Wiley & Sons. Inc. 2007.
16. Fuentes de Internet. Nota: se consideran como fuentes serias de información en Internet a los sitios web de universidades e instituciones de educación superior de prestigio, centros de investigación (no comercial), organismos gubernamentales tanto nacionales como internacionales y organismos sin fines de lucro.
17. Artículos de revistas científicas: *Industrial Chemical Engineering Research, Revista Mexicana de Ingeniería Química, Int. J. Heat & Mass Transfer, Process Biochemistry, Journal of Food Engineering*, entre otros.
18. Yang, Ralph T. *Gas Separation by Adsorption Process*. Butterworth-Heinemann. U.S.A. 1987.
19. Valenzuela, D. P. & Myres, Alan L. *Adsorption Equilibrium Data Handbook*. Prentice-Hall International Editions, Englewood Cliffs, N.J. 1989.