

1. Datos Generales de la asignatura

Nombre de la asignatura:	Hidrometalurgia
Clave de la asignatura:	MEF-1604
SATCA¹:	3-2-5
Carrera:	Ingeniería Química

2. Presentación

Caracterización de la asignatura

Este curso es de gran importancia puesto que le facilita al estudiante la aplicación de sus conocimientos previos para el estudio de los procesos hidrometalúrgicos desde el punto de vista termodinámico y cinético.

La formación adquirida permitirá al egresado entender y controlar estos procesos, partiendo de la capacidad de evaluar las variables que intervienen en cada caso particular.

Esta asignatura aporta al perfil del Ingeniero Químico:

- ✓ Los principios fundamentales de los procesos hidrometalúrgicos y reconocer los parámetros que rigen a este tipo de procesos.
- ✓ La capacidad de aplicar el proceso hidrometalúrgico que mejor se adapte según el mineral o concentrado, de manera tal que permita extraer en forma eficiente un elemento en forma iónica, evitando al mismo tiempo disolver elementos no deseados.
- ✓ La capacidad para calcular las condiciones de operación de los diferentes circuitos hidrometalúrgicos en base a la evaluación de los diferentes equilibrios químicos y los aspectos termodinámicos y cinéticos que ocurren en ellos haciendo énfasis en aquellos procesos que operan actualmente en nuestro país.
- ✓ El conocimiento para la selección de métodos de lixiviación y su aplicación a procesos de separación de minerales.
- ✓ El conocimiento de los fundamentos de utilizar soluciones acuosas para la

¹ Sistema de Asignación y Transferencia de Créditos Académicos

extracción de valores metálicos y las bases fisicoquímicas para el análisis de los procesos de extracción.

- ✓ La capacidad para diferenciar los procesos de extracción de acuerdo a sus características particulares y a las bases fundamentales que los rigen.
- ✓ La capacidad de análisis del estado actual las innovaciones y la posibilidad de desarrollo de los procesos hidrometalúrgicos.

Intención didáctica

Este curso tiene como objetivo lograr que el alumno conozca los fundamentos de utilizar soluciones acuosas para la extracción de valores metálicos, seleccionar métodos de lixiviación para su aplicación y analizar los diferentes métodos de recuperación de metales.

El temario se organiza en cinco unidades, de las cuales las cuatro primeras abarcan los contenidos introductorios y en la última unidad se analizan métodos de recuperación de metales.

En la primera unidad se abordan los conceptos básicos de las soluciones químicas, las relaciones entre actividad-concentración, equilibrios complejos y reacciones de óxido-reducción. Este contenido permitirá conocer, identificar y analizar los fundamentos fisicoquímicos para el análisis de los procesos de extracción, así como manejar software para determinar el comportamiento de las soluciones acuosas utilizadas en la extracción de valores metálicos.

La segunda unidad abarca el análisis de la transferencia de masa y reacciones cinéticas involucradas en los procesos hidrometalúrgicos.

La tercera unidad abarca los fundamentos de los sistemas de lixiviación mediante los cuales el estudiante podrá caracterizar a las partículas, comprender el comportamiento de los fluidos a través de un lecho empacado, así como el vertido y prácticas de lixiviación en el sitio.

La cuarta unidad incluye un panorama general acerca de la lixiviación de metales, óxidos y sulfuros, mientras que en la quinta unidad permitirá conocer métodos de recuperación de metales tales como extracción por solventes e intercambio iónico.

Al finalizar todos estos apartados, se le guiará al estudiante para la conformación de un proyecto integrador en el área de los procesos hidrometalúrgicos, que permitirá al alumno comprender y analizar los fundamentos cinéticos y termodinámicos involucrados en los procesos hidrometalúrgicos de manera integral, con el fin de proporcionarle un criterio

que le permita entender y controlar este tipo de procesos, poniendo énfasis en aquellos que operan actualmente en nuestro país.

El docente actúa como guía, facilitador y asesor orientando al alumno en las actividades de aprendizaje y en la realización de proyectos, crea las condiciones para la construcción del conocimiento promoviendo el desarrollo de capacidades, habilidades y actitudes.

3. Participantes en el diseño y seguimiento curricular del programa

Lugar y fecha de elaboración o revisión	Participantes	Observaciones
Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de la Laguna. Abril de 2016.	Ing. Ana María Flores Romero. Ing. Francisco de Jesús González Peña. Ing. Delia Cárdenas Rodríguez. Ing. Adriana Gamboa Hernández. Ing. Kenia Crispín García. Ing. Karla V. Guevara Amatón. Ing. Simón A. Pedroza Figueroa Ing. Susana M. García Delgado	Revisión de los programas de las materias de la especialidad: Metalurgia

4. Competencia(s) a desarrollar

Competencia(s) específica(s) de la asignatura
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Conoce los principios de los procesos hidrometalúrgicos utilizados en la extracción en solución de minerales en forma iónica evitando disolver elementos no deseados y fundamentando su aplicación según sus bases termodinámicas y cinéticas. ✓ Conoce las razones del desarrollo, los criterios de selección de los procesos hidrometalúrgicos. ✓ Comprende los fundamentos de los principales métodos de reducción en base a su comportamiento fisicoquímico, para poder seleccionar los procesos de reducción de iones en solución.

- ✓ Aplica la fisicoquímica de soluciones, la elección de reactivos de lixiviación, así como los tipos de lixiviación y de separación de iones por medio de su comportamiento termodinámico y fisicoquímico.
- ✓ Conoce y comprende los diferentes procesos de extracción de distintos metales a partir de sus minerales.

5. Competencias previas

- ✓ Conoce el origen y los procesos de purificación y preparación de los minerales utilizados industrialmente.
- ✓ Conoce los fundamentos y técnicas físicas, así como las aplicaciones fisicoquímicas para la concentración de los minerales utilizando diferentes procesos según su objetivo final.
- ✓ Identifica y representa esquemáticamente cada una de las operaciones y procesos unitarios comunes en el campo de la ingeniería realizando los balances macroscópicos de materia y energía con y sin reacción asociados a procesos metalúrgicos.
- ✓ Aplica los conocimientos en termodinámica y fisicoquímica aplicados según el estado, composición y temperatura de los minerales.

6. Temario

No.	Temas	Subtemas
1.	FUNDAMENTOS – SOLUCIONES QUÍMICAS	1.1 Introducción <ul style="list-style-type: none"> 1.1.1 Estado Líquido. 1.1.2 Estructura y Propiedades de Soluciones Acuosas. 1.1.3 Relaciones de Estabilidad. 1.1.4 Tipos de reacción. 1.2 Relación entre Actividad– Concentración <ul style="list-style-type: none"> 1.2.1 Definición de Estado Estándar. 1.2.2 Actividad Iónica Principal–Actividad Iónica Individual. 1.2.3 Estimación de Coeficientes de Actividad Iónicos. 1.3 Equilibrios complejos <ul style="list-style-type: none"> 1.3.1 Iones Complejos.

		<p>1.3.2 Constantes de Estabilidad.</p> <p>1.3.3 Distribución de Especies.</p> <p>1.3.4 Programas para cálculo de Soluciones en Equilibrio.</p> <p>1.4 Reacciones oxidación - reducción</p> <p>1.4.1 Convención.</p> <p>1.4.2 Diagramas de Fases Electroquímicos.</p>
2.	TRANSFERENCIA DE MASA Y REACCIONES CINÉTICAS	<p>2.1 Introducción</p> <p>2.1.1 Clasificación de Reacciones.</p> <p>2.1.2 Definición de Velocidad de Reacción</p> <p>2.2 Cinética homogénea.</p> <p>2.2.1 Ley de la Acción de Masas y Ley de la Velocidad.</p> <p>2.2.2 Teorías de la Constante de Velocidad.</p> <p>2.2.3 Catálisis.</p> <p>2.2.4 Orden de Reacción para datos de un reactor por Lotes o Discontinuo.</p> <p>2.3 Cinética heterogénea.</p> <p>2.3.1 Etapas de Reacción y la Tasa de Control de Paso.</p> <p>2.3.2 Transporte dentro de las Fases.</p> <p>2.3.3. Cinética de las Reacciones de Adsorción.</p> <p>2.3.4 Reacción de la Interfaz.</p> <p>2.4 Reacción Fluido-Partícula – Geometría Esférica.</p>
3.	FUNDAMENTOS DE LOS SISTEMAS DE LIXIVIACIÓN	<p>3.1 Caracterización de partículas</p> <p>3.1.1 Tamaño de la Partícula.</p> <p>3.1.2 Forma de la Partícula.</p> <p>3.1.3 Factor de Forma.</p> <p>3.1.4 Distribución del Tamaño de Partícula.</p> <p>3.2 Vertido y prácticas de lixiviación en el sitio.</p> <p>3.2.1 Introducción.</p> <p>3.2.2 Sistemas de Lixiviación.</p> <p>3.2.3 Lixiviación de minerales de sulfuro.</p> <p>3.2.4 Lixiviación de minerales de óxido.</p> <p>3.3 Diseño de reactores</p> <p>3.3.1 Tipos de Reactores.</p> <p>3.3.2 Parámetros de Diseño: cinética y concentración del lixivante.</p> <p>3.3.3 Modelado y Diseño de sistemas de lixiviación continuos - J.A. Herbst.</p> <p>3.3.3.1 Símbolos y Notación.</p> <p>3.3.3.2 Descripción de las Ecuaciones que rigen.</p> <p>3.3.3.3 Resultados de Simulación por Computadora.</p>

		3.4 Diseño de Hoja de Trabajo y Ejemplo.
4.	LIXIVIACIÓN DE METALES, ÓXIDOS Y SULFUROS	4.1 Introducción <ul style="list-style-type: none"> 4.1.1 Introducción. 4.1.2 Métodos de Lixiviación y Equipos. 4.1.3 Termodinámica de los Reactores de Lixiviación. 4.1.4 Cinética de Lixiviación. 4.2 Lixiviación de metales. <ul style="list-style-type: none"> 4.2.1 Cianuración del Oro. 4.2.2 Lixiviación de Cobre Metálico. 4.3 Lixiviación de óxidos. <ul style="list-style-type: none"> 4.3.1 Termodinámica y Cinética. 4.3.2 Lixiviación de Óxidos de Cobre 4.4 Lixiviación de sulfuros <ul style="list-style-type: none"> 4.4.1 Termodinámica y Cinética 4.4.2 Lixiviación de Sulfuros de Cobre – Estudios Fundamentales. 4.4.3 Procesos de Lixiviación de Sulfuros de Cobre.
5.	CONCENTRACIÓN DE SOLUCIONES Y PURIFICACIÓN	5.1 Métodos de recuperación de metales. 5.2 Extracción por solventes. <ul style="list-style-type: none"> 5.2.1 Introducción. 5.2.2 Caracterización de las Reacciones de Extracción. 5.2.3 Extracción Química. 5.2.4 Sistemas de Extracción por Solventes. 5.3 Intercambio iónico. <ul style="list-style-type: none"> 5.3.1 Introducción. 5.3.2 Composición química, selectividad y cinética de las reacciones. 5.3.3 Aplicaciones Hidrometalúrgicas.

7. Actividades de aprendizaje de los temas

Tema 1. Fundamentos – Soluciones Químicas	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica(s):</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Conoce las propiedades básicas de las soluciones líquidas y los tipos de reacciones y realiza cálculos básicos de energía libre para predecir la estabilidad de varios compuestos y especies en fase acuosa. <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de análisis y síntesis. ✓ Habilidades en el uso de tecnologías de la información. ✓ Capacidad de comunicación oral y escrita. ✓ Solución de problemas. ✓ Trabajo en equipo. ✓ Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica. ✓ Capacidad de aprender. ✓ Habilidad de trabajo autónomo. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Resolver problemas como repaso de principios termodinámicos. ✓ Definir el estado estándar, actividades, principales actividades iónicas y coeficientes de actividad, así como actividades iónicas individuales. ✓ Calcular las actividades iónicas principales. ✓ Estimar los coeficientes de actividades iónicas individuales. ✓ Enlistar las características básicas de iones complejos. ✓ Establecer y resolver una serie de ecuaciones simultáneas para determinar la distribución de las especies acuosas. ✓ Construir diagramas de fase electroquímicos. ✓ Utilizar programas computacionales para determinar la distribución y concentración de especies en soluciones acuosas.
Tema 2. Transferencia de Masa y Reacciones Cinéticas	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica(s):</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Define una reacción homogénea y sus correspondientes expresiones de velocidad, y relaciona las velocidades de uno de los componentes con los otros por medio de la estequiometría. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Definir una reacción homogénea y heterogénea y sus correspondientes expresiones de velocidad. ✓ Relacionar la tasa de un componente a otro por medio de estequiometría.

<p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de análisis y síntesis. ✓ Habilidades en el uso de tecnologías de la información. ✓ Capacidad de comunicación oral y escrita. ✓ Solución de problemas. ✓ Trabajo en equipo. ✓ Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica. ✓ Capacidad de aprender. ✓ Habilidad de trabajo autónomo. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Describir la función de una catálisis y determinar el orden de reacción de los datos del reactor. ✓ Describir la secuencia de reacciones en una reacción heterogénea para describir el concepto de control de la velocidad. ✓ Formular ecuaciones de velocidad para reacciones de superficie química y para reacciones de transporte de masa e interpretar los datos cinéticos para una geometría sencilla de la superficie. ✓ Discutir acerca de la ecuación de velocidad global que aplica a la geometría de placa plana. ✓ Discutir las ecuaciones de velocidad globales que aplican a la cinética de la geometría esférica. ✓ Interpretar algunos datos cinéticos simples y determinar la velocidad límite a la que ocurren algunos procesos hidrometalúrgicos.
<p align="center">Tema 3. Fundamentos de los Sistemas de Lixiviación</p>	
<p align="center">Competencias</p>	<p align="center">Actividades de aprendizaje</p>
<p>Específica(s):</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Describe los métodos de lixiviación, los tipos de equipos de lixiviación, tipos de reacciones de lixiviación, y tipos de reagentes lixiviantes. <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de análisis y síntesis. ✓ Habilidades en el uso de tecnologías de la información. ✓ Capacidad de comunicación oral y 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Caracterizar y describir partículas que pueden producirse en la naturaleza o por medio de operaciones de procesos; para expresar la distribución de un grupo de partículas en términos de una o varias propiedades. ✓ Describir los aspectos básicos de flujo a través de un lecho empacado, y la transferencia de masa asociada. ✓ Describir los conceptos fundamentales para los sistemas de lixiviación aplicados en las operaciones

<p>escrita.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Solución de problemas. ✓ Trabajo en equipo. ✓ Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica. ✓ Capacidad de aprender. ✓ Habilidad de trabajo autónomo. 	<p>hidrometalúrgicas.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Describir los tipos y patrones de flujo de tanques Pachuca de aire ascendente. ✓ Describir las diferencias básicas entre los distintos tipos de impulsores, el patrón de flujo de Theri y estimar la tasa de transferencia de masa en reactores agitados. ✓ Describir las características fundamentales de los tres reactores químicos básicos, así como enumerar los parámetros importantes que rigen el diseño de un reactor. ✓ Completar un diseño de hoja de trabajo.
<p>Tema 4. Lixiviación de Metales, Óxidos y Sulfuros</p>	
<p>Competencias</p>	<p>Actividades de aprendizaje</p>
<p>Específica(s):</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Conoce y comprende los diferentes procesos de extracción de metales, óxidos y sulfuros a partir de sus minerales. ✓ Describe los métodos de lixiviación, los tipos de equipos de lixiviación, tipos de reacciones de lixiviación, y tipos de reagentes lixivantes utilizados para la lixiviación de metales, óxidos y sulfuros. <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de análisis y síntesis. ✓ Habilidades en el uso de tecnologías de la información. ✓ Capacidad de comunicación oral y escrita. ✓ Solución de problemas. ✓ Trabajo en equipo. ✓ Capacidad de aplicar el 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Describir brevemente los métodos de lixiviación, tipos de equipos, reacciones y reactivos de lixiviación. ✓ Describir la teoría y práctica de la cianuración del oro y la lixiviación amoniacal de cobre metálico. ✓ Describir los principios fundamentales y las operaciones básicas de la lixiviación de minerales óxidos. ✓ Discutir los aspectos termodinámicos y cinéticos de la lixiviación de sulfuros minerales. ✓ Describir en términos generales los procesos de lixiviación de níquel y minerales de sulfuro de cobalto. ✓ Enumerar los tipos de especies microbianas utilizadas en los sistemas de lixiviación y sistemas en los cuales

<p>conocimiento en práctica.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de aprender. ✓ Habilidad de trabajo autónomo. 	<p>la acción microbiana es de importancia.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Enumerar los tipos de ambientes de lixiviación utilizados para el tratamiento de sulfuros de cobre en operaciones comerciales. ✓ Describir los tipos básicos de procesos utilizados en operaciones comerciales.
Tema 5. Concentración de Soluciones y Purificación	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específica(s):</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Comprende los fundamentos de los principales métodos de reducción para poder seleccionar los procesos de reducción de iones en solución. ✓ Reconoce los diferentes procesos de refinación hidrometalúrgica y analizar los principios fisicoquímicos de dichos procesos. <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Habilidad para buscar y analizar información proveniente de fuentes diversas. ✓ Capacidad de análisis y síntesis. ✓ Capacidad de organizar. ✓ Comunicación oral y escrita. ✓ Solución de problemas. ✓ Trabajo en equipo, compromiso ético. ✓ Habilidades de investigación, capacidad de aprender. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Describir los tipos de extracción por solventes y caracterizar las principales variables de un proceso de extracción. ✓ Describir los aspectos químicos fundamentales acerca de los solventes extractantes más utilizados. ✓ Discutir la importancia de la extracción por solventes; los parámetros de control importantes; y el tipo de equilibrio utilizado en la práctica industrial. ✓ Describir ejemplos de aplicación de extracción por solventes en procesos comerciales. ✓ Enumerar los tipos y describir la química de los procesos de intercambio iónico. ✓ Dar ejemplos de aplicación de nueve procesos hidrometalúrgicos. ✓ Describir los métodos utilizados en la industria. ✓ Ilustrar y describir las aplicaciones del intercambio iónico en la industria

8. Práctica(s)

- Lixiviación de sulfuros – óxidos.
- Precipitación de Sulfuros.
-

9. Proyecto de asignatura

El proyecto consiste en la elaboración de un proceso que comprenda desde la concentración de minerales, hasta la refinación de un metal, y donde se desarrolle cada etapa requerida para aplicarlo en su procesamiento hidrometalúrgico :

- **Fundamentación.** El alumno realiza búsqueda bibliográfica de las diferentes vías de tratamiento hidrometalúrgico de un mineral rico en cobre. De ser posible realiza la visita a una planta hidrometalúrgica en la región.
- **Planeación.** Con base en el diagnóstico en esta fase se le proporciona un mineral rico en cobre, con su análisis metalúrgico, para que de acuerdo a él realice un diseño de un proceso para tratar dicho mineral por vía hidrometalúrgica.
- **Ejecución:** El alumno, a nivel laboratorio y con base a lo plasmado en el diseño, realiza el tratamiento del material, midiendo las variables que se requieren para llevar a cabo el análisis termodinámico y cinético del proceso.
- **Evaluación.** Al final el alumno entrega un informe del desarrollo del proyecto, en el cual incluye su juicio, análisis, cálculos, observaciones y áreas de oportunidad.

10. Evaluación por competencias

Realizar evaluación diagnóstica, formativa y sumativa.

- ✓ Participación en el desarrollo del curso y en la resolución de problemas.
- ✓ Informes de prácticas y tareas.
- ✓ Exámenes escritos.
- ✓ Exposiciones.
- ✓ Caso integrador.
- ✓ Portafolio de evidencias (formato electrónico)

Los instrumentos de evaluación emplear por el docente:

- ✓ Rúbricas.
- ✓ Cuestionarios.
- ✓ Listas de cotejo.

11. Fuentes de información

Kenneth N. Han (2002) *Fundamentals of Aqueous Metallurgy*. SME.

Esteban M. Domic M. (2001) *HIDROMETALURGIA, fundamentos, procesos y aplicaciones*. Instituto de Ingenieros de Minas de Chile.

Curso de Hidrometalurgia. Arthur Lakes Library, Colorado School of Mines.

Gaviria C. Ana Cecilia, Restrepo B. Óscar Jaime, Bustamante R. M. Oswaldo. (2007). *Notas de Clase. Hidrometalurgia Aplicada*. Línea de Metales Preciosos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín.

Zaki Mubarak. (2010) *Lecture Notes. Hydro-Electrometallurgy*. Department of Metallurgical Engineering. ITB.

Curso de Hidrometalurgia. Universidad de Atacama.

Capítulo 4. Principios en la Hidrometalurgia del Oro. InterMet. Consultores Metalúrgicos.

Ugarte Álvarez, G. (1984) *Curso de Lixiviación*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Instituto de Geología y Metalurgia.