

## PROGRAMA DE CURSO FISICOQUÍMICA METALÚRGICA

### A. Antecedentes generales del curso:

Departamento	Minas (DIMIN)					
Nombre del curso	Físicoquímica metalúrgica	Código	MI3230	Créditos	6	
Nombre del curso en inglés	<i>Metallurgical Physical Chemistry</i>					
Horas semanales	Docencia	3	Auxiliares	2	Trabajo personal	5
Carácter del curso	Obligatorio	X		Electivo		
Requisitos	FI2004: Termodinámica/IQ2212: Termodinámica química					

### B. Propósito del curso:

El curso tiene como propósito que los y las estudiantes apliquen herramientas de la fisicoquímica, cinética y termodinámica tales como funciones de estado y constantes de equilibrio, entre otros, mediante el uso de modelos matemáticos para evaluar la eficiencia en estado estacionario de los procesos metalúrgicos y transformaciones, considerando diferentes tipos de reacciones y/o separaciones. Asimismo, determinan las concentraciones reales de especies químicas y su impacto en procesos metalúrgicos, en equilibrio químico homo y heterogéneo, considerando soluciones diluidas y concentradas.

Por otra parte, busca resolver un problema técnico de metalurgia asociado tratamientos de agua y drenaje de ácido de rocas, considerando restricciones, ventajas y desventajas, análisis económico preliminar y puesta en valor de la propuesta.

El curso tributa a las siguientes competencias específicas (CE) y genéricas (CG):

CE1: Analizar datos y elaborar modelos para la caracterización geo-minero-metalúrgica de materiales, recursos minerales y procesos.

CE2: Concebir, diseñar, optimizar e implementar soluciones científico-tecnológicas en explotación de yacimientos, procesamiento de minerales o metalurgia extractiva.

CG1: Comunicación académica y profesional

Comunicar en español de forma estratégica, clara y eficaz, tanto en modalidad oral como escrita, puntos de vista, propuestas de proyectos y resultados de investigación fundamentados, en situaciones de comunicación compleja, en ambientes sociales, académicos y profesionales.

CG2: Comunicación en inglés

Leer y escuchar de manera comprensiva en inglés variados tipos de textos e informaciones sobre temas concretos o abstractos, comunicando experiencias y

opiniones, adecuándose a diferentes contextos de acuerdo a las características de la audiencia.

**CG4: Trabajo en equipo**

Trabajar en equipo, de forma estratégica y colaborativa, en diversas actividades formativas, a partir de la autogestión de sí mismo y de la relación con el otro, interactuando con los demás en diversos roles: de líder, colaborador u otros, según requerimientos u objetivos del trabajo, sin discriminar por género u otra razón.

**CG5: Sustentabilidad**

Concebir y aplicar nuevas estrategias de solución a problemas de ingeniería y ciencias en el marco del desarrollo sostenible, considerando la finitud de recursos, la interacción entre diferentes actores sociales, ambientales y económicos, además de las regulaciones correspondientes.

**CG6: Innovación:**

Concebir ideas viables y novedosas que generen valor para resolver necesidades latentes, materializadas en productos, servicios o en mejoras a procesos dentro de un sistema u organización, considerando el contexto sociocultural y económico y los beneficios para el usuario.

**C. Resultados de aprendizaje:**

Competencias específicas	Resultados de aprendizaje
CE1	RA1: Resuelve problemas de procesos metalúrgicos mediante funciones de estado y constantes de equilibrio para evaluar la eficiencia en estado estacionario de los procesos, considerando diferentes tipos de reacciones y/o separaciones.
	RA2: Utiliza y elabora modelos termodinámicos y cinéticos para calcular la velocidad de reacciones en sistemas homo y heterogéneos, considerando mecanismos de reacción y etapa controlante en procesos metalúrgicos, con o sin transferencia de electrones.
	RA3: Resuelve problemas de equilibrio químico homo y heterogéneo en soluciones diluidas y concentradas estimando las concentraciones reales de especies químicas y su impacto en procesos metalúrgicos.
	RA4: Utiliza ecuaciones de la fisicoquímica de superficies e interfaces en procesos metalúrgicos, aplicando fundamentos de termoquímica a sistemas homo y heterogéneos, con y sin transferencia de carga.
CE2	RA5: Propone una solución innovadora para un problema en metalurgia sobre tratamientos de agua y drenaje de ácido de rocas, considerando restricciones, ventajas y desventajas, análisis económico preliminar y puesta en valor de la propuesta.

Competencias genéricas	Resultados de aprendizaje
CG1	RA6: Produce, en forma oral y escrita, informes sobre procesos metalúrgicos, metalurgia y solución a un problema de tratamiento de agua y drenaje de ácido de rocas, a fin de explicar con fundamentos y en base a evidencia, dichos procesos y su utilidad para la industria.
CG1, CG2	RA7: Lee en español e inglés diversos textos (capítulos y extractos de memorias de ingeniería y artículos científicos breves), para relacionar e interpretar información aplicable a tópicos de fisicoquímica metalúrgica.
CG4	RA8: Ejecuta con su equipo tareas y ejercicios, mediante una coordinación y planificación de las actividades, considerando colaboración y acuerdo entre los pares.
CG5, CG6	RA9: Analiza estrategias y tecnologías nuevas y eficientes en metalurgia, para integrar a la solución de un problema de tratamiento de aguas y drenaje de ácido, considerando su puesta en valor e impacto ambiental sobre las comunidades, agricultura, mar y napas.

#### D. Unidades temáticas:

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
1	RA1, RA7	Fundamentos de termodinámica química aplicados a sistemas metalúrgicos	2 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
1.1. Rutas de proceso de minerales – reactividad. Sulfuros, óxidos, carbonatos e hidróxidos. 1.2. Fundamentos termodinámicos aplicados en el contexto de los sistemas metalúrgicos. 1.3. Termoquímica y sus aplicaciones en sistemas metalúrgicos. 1.4. Aplicaciones de conceptos de entalpía, entropía, energía libre, capacidad calorífica. 1.5. Balances de materia y energía. 1.6. Equilibrio termodinámico en sistemas de un componente. 1.7. Diagramas de Pourbaix. 1.8. Extensión de estudios de soluciones. Actividad química: Coeficiente de actividad.		El/la estudiante: <ol style="list-style-type: none"> <li>Calcula si procesos relacionados con metalurgia extractiva ocurrirán espontáneamente o no, utilizando funciones de estado como energía libre de Gibbs, entalpía, entropía.</li> <li>Utiliza fundamentos termoquímicos como balance de materia y energía a procesos metalúrgicos, considerando la eficiencia de las transformaciones fisicoquímicas y energéticas.</li> <li>Resuelve problemas de balance de masa y energía, obteniendo las eficiencias teóricas de procesos homo- y heterogéneos.</li> <li>Utiliza modelos de corrección de concentraciones ideales a concentraciones reales de iones en distintas aplicaciones,</li> <li>Lee de manera analítica sobre conceptos asociados a procesos de termodinámica química, relacionando dichos aprendizajes con sistemas metalúrgicos.</li> </ol>	

Modelo Debye Huckel y Modelo Davis. Caso de Estudio.	
Bibliografía de la unidad	<p>[1] Vol. 1 y 2. [2] 3,4, 6, 14-17. [3] Cap. 2 y 4.</p> <p><i>Bibliografía complementaria:</i> [13]</p>

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
2	RA1, RA2, RA7, RA8	Cinética química	3 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
<p>2.1. Teoría cinética, mecanismos y velocidad de reacción: Reacciones homogéneas, ley de acción de masas.</p> <p>2.2. Cinética de orden n.</p> <p>2.3. Efectos de la temperatura en la velocidad de reacciones.</p> <p>2.4. Velocidad de reacciones químicas en sistemas de 0, 1 y 2 dimensiones espaciales.</p> <p>2.5. Diseños simples de reactores de proceso.</p> <p>2.6. Cinética de sistemas heterogéneos: etapas fundamentales, concepto de etapa controlante. Cinética. Mecanismo de núcleo sin reaccionar.</p> <p>2.7. Reacciones de una partícula individual no porosa.</p> <p>2.8. Reacciones en que no se forma capa de producto sólido.</p> <p>2.9. Reacciones en que sí se forma capa de producto sólido.</p> <p>2.10. Reacciones de una partícula individual porosa.</p>		<p>El/la estudiante:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Calcula la cinética de reacciones en sistemas homo y heterogéneos, usando ecuaciones cinéticas matemáticas.</li> <li>2. Utiliza las propiedades termodinámicas para definir si un proceso ocurre espontáneamente o requiere de energía para su realización.</li> <li>3. Trabaja con su equipo de manera coordinada en problemas asociados a la cinética química de reacciones homogéneas y heterogéneas.</li> <li>4. Lee de manera analítica, relacionando e interpretando información sobre conceptos y principios de cinética heterogénea.</li> </ol>	
Bibliografía de la unidad		<p>[4] Cap. 2 y 4. [5] Cap. 2,3.</p> <p><i>Bibliografía complementaria:</i> [12] [15]</p>	

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
3	RA3, RA7	Cinética electrometalúrgica	3 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
3.1. Cinética electroquímica. 3.2. Controles cinéticos. 3.3. Ley de Faraday. 3.4. Control por transferencia de carga (ley de Tafel, ley de Butler-Volmer). 3.5. Control por transferencia de masa (ley de Fick). 3.6. Representaciones gráficas.		El/la estudiante: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Estima la transferencia de carga por unidad de tiempo (corriente eléctrica) y el proceso químico involucrado, aplicando la ley de Faraday y la ecuación de Butler-Volmer.</li> <li>2. Define gráfica y cuantitativamente el mecanismo de reacción en sistemas electroquímicos, mediante diagramas de <math>i</math> vs <math>E</math> y Evans.</li> <li>3. Analiza y evalúa la posibilidad de realizar mejoras a la eficiencia de procesos electrolíticos, considerando parámetros de control por transferencia de carga y de masa.</li> <li>4. Lee de manera analítica sobre balance de carga y masa en celdas electrolíticas, estableciendo las ideas principales aplicables a cinemática electrometalúrgica.</li> </ol>	
Bibliografía de la unidad		[7] Cap. 3. [8] Vol. 2.	

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
4	RA2, RA3, RA4, RA8, RA7	Aplicaciones industriales de la fisicoquímica metalúrgica	3 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
4.1. Aspectos termodinámicos y cinéticos. 4.2. Cementación y efectos galvánicos. 4.3. Electro refinación. 4.4. Electro obtención. 4.5. Aplicaciones.		El/la estudiante: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Elabora diagramas de Evans para identificar y representar posibles mejoras a la eficiencia de los procesos en el contexto de la electrometalurgia.</li> <li>2. Compara las operaciones convencionales de electrometalurgia con nuevas tendencias, determinando ventajas y desventajas de cada una.</li> <li>3. Trabaja con su equipo de manera colaborativa y coordinada en problemas sobre electrometalurgia clásica.</li> <li>4. Elabora, de manera clara y coherente, un reporte escrito sobre la eficiencia de los procesos de electrorrefinación y electro obtención de metales, tales como cementación y efectos galvánicos.</li> </ol>	
Bibliografía de la unidad		[10] <i>Bibliografía complementaria:</i> [12] [16]	

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
5	RA4, RA5, RA6, RA7, RA8, RA9	Fisicoquímica de superficies e interfases	4 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
4.1. Adsorción: química y física. 4.2. Aplicación a tratamiento de aguas 4.3. Modelos termodinámicos y cinéticos. 4.4. Aspectos coloidales en procesamiento de minerales y metalurgia extractiva. 4.5. Teoría de burbujas. 5.6.1. Teoría de Laplace. 5.6.2. Presión de separación y fuerzas superficiales. 5.6.3. Fuerzas de Van der Waals. 5.6.4. Teoría de doble capa eléctrica y fuerzas asociadas – fuerzas DLVO y potencial Z. 5.6.5. Fuerzas no-DLVO: hidratación e hidrofobización. 5.6.6. Descripción cuantitativa de estructuras de espumas. 5.6.7. Reología de espumas. 5.6.8. Drenaje y colapso de espumas. 5.6.9. Otras aplicaciones – emulsiones.		El/la estudiante:  1. Resuelve problemas de estabilidad de adsorción en procesos industriales, usando ecuaciones derivadas de la química de superficie e interfases. 2. Utiliza modelos matemáticos para definir una solución a problemas sobre sobre tratamientos de agua y drenaje de ácido de rocas. 3. Determina restricciones, ventajas y desventajas de la propuesta de solución a un problema de metalurgia sobre tratamientos de agua y drenaje de ácido de rocas. 4. Realiza un análisis económico preliminar del estudio de caso, considerando costos operacionales. 5. Realiza cálculos para determinar la eficiencia de estrategias de distintos tratamientos innovadores de aguas y de drenaje de ácido de rocas. 6. Analiza y evalúa, a nivel básico, la puesta en valor, eficiencia e impacto ambiental de la solución sobre las comunidades, actividades agrícolas, mar, napas y subterráneas. 7. Expone, con su equipo, los resultados de la propuesta de solución, reportando los aspectos técnicos involucrados, las fases, eficiencia e impacto.	
Bibliografía de la unidad		[9] Basmadjian, 2018, Cap. 1 – 3.  <i>Bibliografía complementaria:</i>  [11] Farooq, 2017, Cap. 10. [14] Weaire, 1999, Cap. 7, 1,2, 3, 11, 12.	

### E. Estrategias de enseñanza - aprendizaje:

El curso considera las siguientes estrategias de enseñanza:

- Clases expositivas
- Estudio de caso.
- Resolución de problemas.

### F. Estrategias de evaluación:

El curso considera las siguientes instancias de evaluación:

Tipo de evaluación	Resultado de aprendizaje asociado a la evaluación
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tareas/ejercicios</li> </ul>	Tarea 1 evalúa RA3 (unidad 1: actividad en la concentración real). Tarea 2: evalúa RA2 y RA9 (reporte asociado a la unidad 5)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controles escritos</li> </ul>	Control 1 evalúa RA1, RA2 y RA3 (unidad 1 a la 3) Control 2 evalúa RA2, RA4, RA5 (unidad 4 a la 6)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proyecto acotado sobre tratamiento de aguas y drenaje de ácido de rocas.</li> </ul>	Evalúa RA5, RA6, RA7, RA8, RA9
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Examen</li> </ul>	Evalúa RA1, RA2, RA3, RA4

*Al inicio de cada semestre, el cuerpo académico informará el tipo y cantidad de evaluaciones, así como las ponderaciones asociadas.*

## G. Recursos bibliográficos:

### Bibliografía obligatoria

- [1] Santamaría:  
Santamaría, F. (2006). **Curso de Química General**. Vol. 1 y 2. Editorial Universitaria.
- [2] Atkins:  
Atkins, P.W (2008). **Química Física**. Médica Panamericana.
- [3] Duque:  
Duque R. (2014). **Lixiviación de Minerales Sulfurados de Cobre de baja ley en Columnas Unitarias, Utilizando la Tecnología CuproChlor**. Memoria de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile.
- [4] Fredes:  
Fredes, S. (2015). **Diseño de Mejores Prácticas Operacionales en el Procesamiento de concentrados de Molibdeno para Minera Los Pelambres**. Memoria de Ingeniero Civil Químico, Universidad de Chile.
- [5] Han:  
Han, K.N. (2002) *Fundamentals of Aqueous Metallurgy*, SME.
- [6] Bard:  
Bard, A. (2002) *Electrochemical Methods*, Wiley, 2nd Ed.
- [7] Bockris & Reddy:  
Bockris, J.O.M., Reddy, A.K.N. and Gamboa - Aldeco, M. (2000). *Modern Electrochemistry*. Kluwer-Plenum.
- [8] Burkin:  
Burkin, A.R. (2001) *Chemical Hydrometallurgy*, ICP Pubs.
- [9] Basmadjian:  
Basmadjian (2018). *The Little Adsorption Book: A Practical Guide for Engineers and Scientists*. 1st Edition, CRC Press.
- [10] Pugh:  
Pugh, R.J. (2016) *Bubble and Foam Chemistry*, Cambridge University Press; 1 edition.
- [11] Farooq  
Farooq R., Ahmad Z. (2017) *Physico-chemical wastewater treatment and resource recovery*, INTECH Pub.

### Bibliografía complementaria:

- [12] Houston:  
Houston, P.L. (2006). *Chemical kinetics and reaction dynamics*. Dover Publications.
- [13] Burgot:  
Burgot, J.L. (2010). *Predicting Redox Reactions by Graphical Means* [recurso electrónico]. Springer.
- [14] Weaire:  
Weaire D., Hutzler S. (1999) *The physics of foams*, Oxford
- [15] Levenspiel  
Levenspiel, O (1999). *Chemical Reactor Omnibook*. 729 p., Ch. 51-55.
- [16] Jergensen:  
Jergensen, G.V. (1999) *Copper Leaching, Solvent Extraction, and Electrowinning Technology*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Pubs.



## H. Datos generales sobre elaboración y vigencia del programa de curso

Vigencia desde:	Primavera, 2021
Elaborado por:	Gonzalo Montes
Validado por:	Validación CTD de Minas
Revisado por:	Área de Gestión Curricular