

## PROGRAMA DE CURSO

### DISEÑO Y PLANIFICACIÓN DE MINAS SUBTERRÁNEAS

#### A. Antecedentes generales del curso:

Departamento	Ingeniería de Minas					
Nombre del curso	Diseño y planificación de Minas subterráneas	Código	MI5120	Créditos	6	
Nombre del curso en inglés	<i>Underground mine planning and design</i>					
Horas semanales	Docencia	3	Auxiliares	1,5	Trabajo personal	5,5
Carácter del curso	Obligatorio	X		Electivo		
Requisitos	IN3301: Evaluación de proyectos, MI4070: Fundamentos de tecnología minera, MI4040: Análisis estadístico y geoestadístico de datos					

#### B. Propósito del curso:

El curso tiene como propósito que los y las estudiantes determinen los métodos más apropiados para una explotación minera subterránea relacionando parámetros y características propias del macizo rocoso y su geología, además de factores técnicos y ambientales. Asimismo, se espera que los y las estudiantes diseñen y planifiquen las unidades básicas mineras e infraestructura necesaria, generando programas de producción que contemplen restricciones medioambientales, de diseño y producción y se ajusten a requisitos económicos y normativos, considerando la incertidumbre de mercado, operacional y geológica.

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

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

CE3: Diseñar operaciones y proyectos mineros, aplicando conocimientos de ingeniería y gestión.

CE5: Evaluar y/u optimizar técnica y económicamente recursos, procesos y proyectos de ingeniería en el ámbito de la industria minera, incorporando las dimensiones sociales, ambientales e interpersonales.

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.

**CG3: Compromiso ético**

Actuar de manera responsable y honesta, dando cuenta en forma crítica de sus propias acciones y sus consecuencias, en el marco del respeto hacia la dignidad de las personas y el cuidado del medio social, cultural y natural.

**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.

### C. Resultados de aprendizaje:

Competencias específicas	Resultados de aprendizaje
CE3	RA1: Compara distintos métodos de explotación subterráneos, tales como, sublevel stoping, block/panel caving, room and pillar, entre otros, considerando el tipo y distribución espacial del recurso mineral para determinar las unidades básicas mineras e infraestructura necesaria.
CE2, CE5	RA2: Diseña sistemas de diferentes métodos de explotación subterránea, considerando aspectos económicos, geométricos y del entorno físico y social, para proponer soluciones técnicas factibles, aplicables al desarrollo de un proyecto minero.
CE3, CE5	RA3: Aplica técnicas y modelos de optimización para definir la secuencia, el programa de producción y las reservas mineras aplicables a un proyecto minero subterráneo, mediante el uso de softwares de planificación y diseño, considerando restricciones físicas y operacionales.
CE2	RA4: Utiliza herramientas de programación matemática y/o algoritmos y heurísticas, para modelar y resolver problemas de diseño y secuenciamiento de minas subterráneas, considerando restricciones geotécnicas, de procesamiento e incertidumbre.
Competencias genéricas	Resultados de aprendizaje
CG1	RA5: Expone, en forma oral y/o escrita, sobre la definición de la secuencia, el programa y las reservas mineras aplicables a un proyecto minero, argumentando de forma clara y coherente sobre los supuestos y parámetros utilizados en el diseño de una mina subterránea.
CG1, CG2	RA6: Utiliza conceptos de optimización aplicada a minería subterránea, a partir de una lectura comprensiva de textos y artículos, en español e inglés, donde extraer y sintetizar información sobre el estado del arte en planificación minera y su desarrollo.

CG3, CG5	RA7: Estima el impacto económico, ambiental y social de la ejecución de un proyecto de minas subterráneas, considerando la magnitud del proyecto y la injerencia de las decisiones del planificador sobre dicho costo ambiental.
----------	--

#### D. Unidades temáticas:

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
1	RA1, RA6	Métodos de explotación subterráneos	2 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
1.1. Conceptos y definiciones básicas de la explotación de minas. 1.2. Definición de los métodos de explotación. 1.3. Definición de yacimiento. 1.4. Métodos de explotación. 1.5. Clasificación de los métodos subterráneos. 1.6. Aplicación de sistemas productivos. 1.7. Consideraciones geomecánicas de los métodos de explotación. 1.8. Características de macizo rocoso. 1.9. Régimen de esfuerzos tectónicos. 1.10. Sistemas estructurales geotécnicamente activos y pasivos. 1.11. Hundibilidad/ Estabilidad. 1.12. Continuidad y geometría del yacimiento. 1.13. Selectividad y productividad. 1.14. Costo e inversiones. 1.15. Variables de entorno: legal, social, medio ambiental. 1.16. Consumo energético y recursos críticos.		El/la estudiante: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Compara los distintos métodos de explotación de minas subterráneas, diferenciándolos y explicando dichas diferencias a partir de las características de estos métodos de explotación.</li> <li>2. Fundamenta de manera técnica las ventajas de aplicar una aproximación sistémica al proceso de diseño en ingeniería de minas, en base a ejemplos reales.</li> <li>3. Utiliza diferentes variables y criterios que influyen en la definición del sistema minero, integrando características del macizo rocoso, entorno socioeconómico, restricciones productivas y criterios de diseño utilizados para aplicar las operaciones unitarias mineras.</li> <li>4. Lee, en español e inglés, apuntes, handbooks, capítulos de libros sobre características de métodos de explotación subterránea y sus características, así como metodologías de selección.</li> </ol>	
Bibliografía de la unidad		[1] [Kennedy, cap. 5, 6, 7] [2] [Hustrulid, Section 2, Section 1]	

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
2	RA2, RA3, RA5, RA7	Diseño de métodos auto-soportados y con relleno	4 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
<p>2.1. Métodos auto-soportados.</p> <p>2.1.1. Variantes de métodos subterráneos auto-soportados.</p> <p>2.1.2. Comparación de variantes de explotación para caserones vacíos.</p> <p>2.1.3. Definición de ritmo de explotación.</p> <p>2.2. Diseño de unidad básica de explotación.</p> <p>2.2.1. Diseño de caserones.</p> <p>2.2.2. Diseño de pilares.</p> <p>2.2.3. Diseño de relleno.</p> <p>2.2.4. Secuencia de extracción de caserones.</p> <p>2.3. Infraestructura mina.</p> <p>2.3.1. Preparación del caserón.</p> <p>2.3.2. Diseño nivel de extracción.</p> <p>2.3.3. Diseño nivel de perforación.</p> <p>2.3.4. Diseño nivel de transporte.</p> <p>2.3.5. Dimensionamiento unidades de traspaso, chimeneas, piques.</p> <p>2.4. Accesos principales y secundarios.</p> <p>2.4.1. Rampas.</p> <p>2.4.2. Piques.</p> <p>2.5. Aspectos relevantes para la selección de equipos mineros en función del diseño y viceversa.</p> <p>2.6. Ventilación y drenaje en métodos auto-soportados.</p> <p>2.6.1. Circuitos principales y secundarios de ventilación.</p> <p>2.6.2. Sistemas de drenaje.</p> <p>2.7. Aspectos de planificación. Secuencia de explotación.</p> <p>2.7.2. Plan de producción y preparación.</p>		<p>El/la estudiante:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Propone alternativas y/o variantes de sistemas mineros aplicados a minería auto-soportada, considerando particularidades de un determinado yacimiento.</li> <li>Reconoce los fundamentos y características distintivas de los métodos de explotación de minas subterráneas auto-soportadas.</li> <li>Diseña sistemas de explotación, utilizando técnicas o métodos de explotación con o sin soporte artificial, dependiendo del caso o requerimiento.</li> <li>Calcula productividad, comprendiendo la estructura de costos general para la variante del método auto-soportado y/o con relleno y la alternativa de sistema minero escogido.</li> <li>Redacta y/o presenta un proyecto computacional de ingeniería asociado a métodos auto-soportados y/o con relleno, informando, de forma clara y coherente, sobre los supuestos y parámetros utilizados, junto con el análisis de resultados.</li> <li>Analiza, de forma reflexiva, el impacto de una propuesta o proyecto de minería subterránea, considerando sus efectos sobre el medio natural, cultural y social.</li> <li>Analiza el impacto ambiental, social y/o económico de sus decisiones en la confección de un proyecto minero auto-soportado y/o con relleno.</li> </ol>	

2.7.3. Plan de ventilación. 2.8. Consideraciones de costos. 2.8.1. Costos de operación mina. 2.8.2. Costos de capital e inversiones.	
Bibliografía de la unidad	[2] [Hustrulid, Section 2, Section 6] [3] [Howart, cap. 18] [4] [Brady, cap. 13] [5] [Hartman, cap. 14] [2] [Hustrulid, Section 5, Section 7] [3] [Howart, cap. 19] [4] [Brady, cap. 14] [5] [Hartman, cap. 14] [6] [Landriault]

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
3	RA2, RA3, RA5, RA7	Métodos por hundimiento	5 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
3.1. Métodos por hundimiento. 3.1.1. Variantes del método subterráneo por hundimiento. 3.1.2. Comparación de métodos de explotación por hundimiento. 3.2. Fundamentos de los métodos de explotación por hundimiento. 3.2.1. Hundibilidad. 3.2.2. Fragmentación. 3.2.3. Flujo gravitacional. 3.2.4. Recuperación y dilución. 3.3. Infraestructura mina. 3.3.1. Diseño nivel de producción. 3.3.3. Diseño nivel de hundimiento. 3.3.4. Diseño nivel de transporte. 3.3.5. Dimensionamiento unidades de traspaso, chimeneas, piques. 3.4. Accesos principales y secundarios 3.4.1. Rampas. 3.4.2. Piques. 3.5. Sistema minero y secuenciamiento.		El/la estudiante: 1. Propone alternativas y/o variantes de sistemas mineros aplicados a minería por hundimiento, considerando particularidades de un determinado yacimiento. 2. Reconoce los fundamentos y características distintivas de los métodos de explotación de minas subterráneas por hundimiento. 3. Diseña sistemas de explotación, utilizando técnicas o métodos de explotación con o sin soporte artificial, dependiendo del caso o requerimiento. Calcula productividad, comprendiendo la estructura de costos general para la variante del método por hundimiento y la alternativa de sistema minero escogido. 4. Redacta y/o presenta un proyecto computacional de ingeniería asociado a métodos por hundimiento, informando, de forma clara y	

<p>3.6. Consideraciones de costos. 3.7. Programas de Producción. 3.7.1. Secuenciamiento. 3.7.2. Velocidad de extracción 3.7.3. Programa de preparación minera. 3.7.4. Funciones de extracción y apertura de área.</p>	<p>coherente, sobre los supuestos y parámetros utilizados, junto con el análisis de resultados. 5. Analiza, de forma reflexiva, el impacto de una propuesta o proyecto de minería subterránea, considerando sus efectos sobre el medio natural, cultural y social. 6. Analiza el impacto ambiental, social y/o económico de sus decisiones en la confección de un proyecto minero por hundimiento.</p>
<p>Bibliografía de la unidad</p>	<p>[11] Handbook, 1992, caps: 18 al 20] [14] Flores, G. (2014). Future challenges and Why Cave Mining Must Change. Newcrest Mining Limited, Australia. [15] Maybee, B. and Hall, S. (2010). Optimisation of Construction and Production in a Block Cave Operation. [16] Flores, G and Logan, A. (2008) Caving Technology Development and its Application by Newcrest Mining at Cadia East Project. [17] Castro, R. and Trubman, R. (2008). An Experimental Review and Simulation of Gravity Flow in Coarse Materials for Block/Panel Caving.</p>

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
4	RA3, RA4, RA6, RA7	Planificación de minas subterráneas	4 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
4.1 Envolvente económica. 4.2 Leyes de corte. 4.3 Optimización de leyes de corte mediante algoritmo de Lane. 4.4 Leyes de corte y procesos. 4.5 Leyes de corte y recuperación variable. 4.6 Programas de producción y políticas de leyes de corte. 4.7 Planificación de minas subterráneas. 4.8 Selección del método de explotación.		El/la estudiante:  1. Calcula la envolvente económica en una mina subterránea (para un sistema/método de explotación en particular), cuantificando los recursos minerales potenciales. 2. Utiliza el concepto de costo de oportunidad en la definición de la envolvente económica y/o en los planes de producción. 3. Plantea, fórmula y resuelve problemas de diseño y/o producción considerando restricciones operacionales, sociales y/o medioambientales. 4. Aplica técnicas y modelos de optimización para definir la secuencia, el programa de producción y las reservas mineras aplicables a un proyecto minero subterráneo. 5. Analiza escenarios dentro de un proyecto minero subterráneo asociados a componentes o dilemas ético-ambientales. 6. Explica de manera clara, en forma oral y/o escrita, los fundamentos de la construcción de un programa de producción de una mina subterránea, considerando supuesto, alcances, resultados y consecuencias.	
Bibliografía de la unidad		[Handbook, 1992, caps: 18 al 20] [Handbook of operations research in natural resources, caps: 30, 31, 32] [Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). Introduction to Algorithms. third. New York.]	



## E. Estrategias de enseñanza:

El curso considera las siguientes estrategias de enseñanza:

- **Clase expositiva:** se presentan conceptos fundamentales de diseño y planificación de mina subterránea, los que aplica a ejemplos o casos de estudio.
- **Trabajo de laboratorio computacional:** mediante el uso de softwares de planificación y diseño, se diseñan sistemas de explotación subterráneos, considerando restricciones físicas y operacionales.
- Se desarrollará un **proyecto estructural** a lo largo del curso y desarrollo de tareas autocontenidas, donde se trabajará el modelamiento para definir la secuencia, el programa de producción y las reservas mineras aplicables a un proyecto minero subterráneo; se analizará también el dilema ético y aspectos ambientales asociados
- **Lectura y análisis de textos:** los y las estudiantes deberán leer sobre diversos tópicos de diseño y planificación subterránea, extrayendo y sintetizando información sobre el estado del arte en planificación minera y su desarrollo, así como en modelos de optimización aplicables.

## F. Estrategias de evaluación:

El curso tiene distintas instancias de evaluación entre las que se pueden mencionar:

Tipo de evaluación	Resultado de aprendizaje asociado a la evaluación
● Controles y/o tareas	Evalúa RA1, RA2, RA4, RA6
● Proyecto con informes de avance y presentaciones	Evalúa RA2, RA3, RA5, RA6, RA7
● Examen	Evalúa RA1, RA2, RA4, RA6

## G. Recursos bibliográficos:

### Bibliografía obligatoria:

- [1] Kennedy, B.A., 1992. Surface mining, 2<sup>nd</sup> edition, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.
- [2] Hustrulid, W, Bullock, R.L. (2001). Underground Mining Methods: Engineering fundamentals and International Case Studies, SME.
- [3] Howart L. Hartman (1992). SME Mining Engineering Handbook, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.
- [4] Brady B.H.G, Brown, E.T. (2004). Rock Mechanics for underground mining, Kluwer Academic Press.
- [5] Hartman, L, Ramani, Mutmansky, J.M, Wang, Y.J. 1997. Mine ventilation and air conditioning, 3rd edition. John Wiley and Sons: USA.
- [6] Landriault, D. (2001). Back filling in underground mining. In: Engineering fundamentals and International Case Studies, SME. pp. 601.
- [7] Brown (2007). Block Caving Geomechanics, International Caving Study 1997-2004, JKMR, University of Queensland.
- [8] Karzulovic, A, Alfaro, M. (Eds) (2004). Proceedings of MassMin. Instituto de Ingenieros de Chile. Sections: Transition from Open pit to Underground Mining; Automation in Mass Mining.
- [9] Schunnesson, H, Nordlung (Eds) (2008). Proceedings of MassMin. Lulea University of Technology, Sweden. Sections: Transition of mining method; Mining equipment and automation.
- [10] Weintraub, A. Handbook of operations research in natural resources.
- [11] Handbook, 1992, caps: 18 al 20.
- [12] Handbook of operations research in natural resources, caps: 30, 31, 32.
- [13] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). Introduction to Algorithms. third. *New York*.
- [14] Flores, G. (2014). Future challenges and Why Cave Mining Must Change. Newcrest Mining Limited, Australia.
- [15] Maybe, B. and Hall, S. (2010). Optimisation of Construction and Production in a Block Cave Operation.
- [16] Flores, G and Logan, A. (2008). Caving Technology Development and its Application by Newcrest Mining at Cadia East Project.
- [17] Castro, R. and Trubman, R. (2008). An Experimental Review and Simulation of Gravity Flow in Coarse Materials for Block/Panel Caving.

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

Vigencia desde:	Otoño, 2023
Elaborado por:	Juan Luis Yarmuch
Validado por:	Validación académico par: Javier Santibáñez Boric Validación CTD de Minas
Revisado por:	Área de Gestión Curricular