

PROGRAMA DE CURSO AGUA Y RELAVES

A. Antecedentes generales del curso:

Departamento	Departamento de Ingeniería de Minas					
Nombre del curso	Agua y relaves	Código	MI5170	Créditos	3	
Nombre del curso en inglés	<i>Water and tailings</i>					
Horas semanales	Docencia	1,5	Auxiliares	--	Trabajo personal	3,5
Carácter del curso	Obligatorio	X		Electivo		
Requisitos	MI4250: Procesamiento de Minerales II, MI4135: Metalurgia extractiva					

B. Propósito del curso:

Este curso tiene como propósito el estudio de los depósitos de relaves en sus diversas dimensiones de impacto, excluyendo detalles de diseño estructural. En particular, se estudia el rol del agua en asociación con el manejo, la disposición, la seguridad y el potencial impacto ambiental de los relaves. El énfasis del curso es profesional.

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

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

CE4: Gestionar, coordinar y supervisar de manera sustentable operaciones y proyectos en evaluación de yacimientos, geomecánica, explotación minera, procesamiento de minerales, procesamiento de minerales y metalurgia extractiva.

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.

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.

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.

C. Resultados de aprendizaje:

Competencias asociadas	Resultados de aprendizaje
CE3, CE4	RA1: Explica de manera clara, empleando conceptos técnicos, las variantes relacionadas con la infraestructura y las características operacionales de los depósitos de relaves, en conexión con la realidad internacional con un énfasis en los depósitos de relaves chilenos.
CE5	RA2: Usa modelos de balance de masa y energía para analizar y representar la huella hídrica asociada a la presencia de los depósitos de relaves, según sus variantes constructivas, incluyendo elementos distintivos entre los depósitos de relaves convencionales y no convencionales.
CE5, CG5	RA3: Analiza posibles medidas de mitigación y control de condiciones operacionales subestándar, junto con los efectos de posibles fallas de los depósitos de relaves, identificando el impacto más probable al medioambiente y la seguridad de las personas
CE3 CE3, CG5	RA4: Analiza las opciones de largo plazo para una operación y cierre sustentable de depósitos de relaves, identificando cómo su actuar genera efectos futuros en las diferentes dimensiones relevantes de los depósitos de relaves y su entorno.

Competencias genéricas	Resultados de aprendizaje
CG1, CG4	RA5: Redacta un informe de avance y un informe final sobre un tema de investigación o análisis bibliográfico sobre soluciones o estrategias relacionadas con infraestructura y operación de sistemas de relaves (posibles medidas de mitigación o control de condiciones operacionales), utilizando las convenciones de la comunicación profesional (lenguaje objetivo, claro, preciso).
	RA6: Expone sobre un tema de investigación o análisis bibliográfico respecto de una solución o estrategia relacionada con infraestructura y operación de sistemas de relaves (posibles medidas de mitigación o control de condiciones operacionales), planteando, con su equipo, de forma clara, precisa y coherente sus ideas y resultados, a través de una argumentación oral coherente.
CG4	RA7: Trabaja, colaborativamente con su equipo, en el análisis de un caso o investigación bibliográfica y en la elaboración de informes, considerando el cumplimiento de roles y tareas, el nivel de involucramiento en la toma de decisiones sobre el trabajo y el apoyo a otros integrantes del grupo.

D. Unidades temáticas:

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
1	RA1	Depósitos de relaves	1 semana
Contenidos		Indicador de logro	
1.1. Origen de los depósitos de relaves. 1.2. Métodos constructivos y componentes principales. 1.3. Realidad nacional e internacional de los depósitos de relaves.		El/la estudiante: <ol style="list-style-type: none"> Identifica las rutas de proceso más comunes conducentes a la generación de relaves Determina los métodos constructivos de los depósitos de relaves y sus variantes, incluyendo los elementos distintivos entre los depósitos de relaves convencionales y no convencionales. Analiza, de manera comparada, la realidad nacional e internacional asociada a depósitos de relaves en cuanto a número y tamaño. Dimensiona la relevancia del estudio de los depósitos de relaves y su infraestructura asociada en el contexto minero y social, reflexionando sobre esto. 	
Bibliografía de la unidad		[Fuerstenau & Han (2003)] [Blight (2010)] [MI5170 (2023)]	

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
2	RA2	Balances hídricos en depósitos de relaves	1 semana
Contenidos		Indicador de logro	
2.1. Balances de masa en corrientes de relaves. 2.2. Acumulación y retención de agua en cubetas de depósitos de relave. 2.3. Pérdidas de agua por resaturación y evaporación. 2.4. Guías nacionales e internacionales de procedimientos aceptados por la industria.		El/la estudiante: 1. Determina el contenido de agua en los sistemas de transporte y espesamiento. 2. Calcula, de manera aproximada, órdenes de magnitud del agua atrapada en cubetas de depósitos. 3. Usa modelos e información proveniente de estaciones de monitoreo para estimar pérdidas de agua por resaturación y evaporación. 4. Revisa, analíticamente, guías y documentos que respaldan procedimientos aceptados por la industria para la estimación de balances hídricos.	
Bibliografía de la unidad		[Blight (2010)] [MI5170 (2023)] [Codelco (2022)]	

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
3	RA1, RA3	Manejo y disposición de relaves	3 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
3.1. Métodos de manejo de relaves según su contenido de agua. 3.2. Capacidad de sistemas de transporte. 3.3. Transporte hidráulico de relaves Velocidad de depósito y régimen de flujo. 3.4. Transporte de relaves secos por correas. 3.5. Contexto legal de disposición de relaves y normas internacionales. 3.6. Operaciones de disposición de relaves convencionales en tranques y embalses. 3.7. Operaciones de disposición de relaves de alta densidad.		El/la estudiante: 1. Identifica y selecciona, según las condiciones de proceso y entorno, la mejor estrategia de transporte de relaves, incluyendo las variantes del transporte hidráulico de sólidos y el manejo de materiales secos. 2. Aplica conceptos energéticos, reológicos y mecánicos básicos para estimar la capacidad de sistemas de manejo de relaves. 3. Utiliza el concepto de velocidad de depósito y régimen de flujo para establecer restricciones operacionales en sistemas de transporte hidráulico 4. Aplica criterios básicos de capacidad de correas transportadoras para dimensionar sistemas a nivel conceptual.	

<p>3.8. Operaciones de disposición de relaves filtrados.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 5. Determina las restricciones operacionales provenientes del marco normativo legal chileno y de algunas normas internacionales sobre la construcción de depósitos de relaves. 6. Distingue y analiza, con relación a los procesos aguas arriba y aguas abajo, los factores operacionales y de infraestructura que definen las operaciones de disposición y recuperación de relaves convencionales (tranques y embalses). 7. Distingue y analiza, con relación a los procesos aguas arriba y aguas abajo, los factores operacionales y de infraestructura que definen las operaciones de disposición de relaves de alta densidad. 8. Distingue y analiza, con relación a los procesos aguas arriba y aguas abajo, los factores operacionales y de infraestructura que definen las operaciones de disposición de relaves filtrados.
<p>Bibliografía de la unidad</p>	<p>[Fuerstenau & Han (2003)] [Sernageomin (2007)] [Blight (2010)] [Fourie (2012)] [Global Tailings Review (2020);] [Abulnaga (2021)] [Ihle & Valencia (2023)]</p>

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
4	RA1, RA3, RA4	Seguridad de depósitos de relaves	3 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
4.1. Resistencia de muros de arena. 4.2. Parámetros críticos. 4.3. Mecanismos de falla. 4.4. Distancia peligrosa y riesgo en el contexto del cambio climático. 4.5. Legislación y normativas nacionales e internacionales sobre depósitos de relaves. 4.6. Monitoreo de estabilidad física.		El/la estudiante: <ol style="list-style-type: none"> 1. Usa conceptos básicos de mecánica de suelos, para identificar los elementos esenciales que definen la resistencia de muros. 2. Identifica cuáles son los elementos que controlan la estabilidad física (EF) de un depósito de relaves. 3. Determina los posibles efectos de los parámetros críticos de manera que esta estabilidad puede verse comprometida, y en particular los riesgos asociados a la presencia no controlada de agua. 4. Compara conceptualmente los efectos de una falla física de un depósito de relaves, considerando los potenciales efectos del cambio climático, efectos futuros en diferentes dimensiones de la sustentabilidad. 5. Relaciona la noción de estabilidad física (EF) con el marco normativo vigente sobre depósitos de relaves. 6. Identifica la instrumentación in situ y remota empleada comúnmente para el monitoreo de estabilidad física de depósitos de relaves activos y abandonados. 	
Bibliografía de la unidad		[Blight (2010)] [MI5170 (2023)]	

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
5	RA3, RA4	Calidad de agua en depósitos de relaves	2 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
5.1. Procesos hidroquímicos en depósitos de relaves. 5.2. Estabilidad química, aguas de contacto y calidad de aguas efluentes de depósitos de relaves.		El/la estudiante: 1. Identifica y analiza posibles resultados de las interacciones químicas entre relaves y agua, una vez depositados los relaves y sus efectos en el agua. 2. Analiza algunos casos representativos de los depósitos de relaves de la gran minería chilena. 3. Distingue y analiza las implicancias potenciales (técnicas, legales y ambientales) de infiltraciones fuera del depósito de relaves.	
Bibliografía de la unidad		[Appelo & Postma (2004)] [Lottermoser (2010)]	

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
6	RA1, RA3, RA5, RA6, RA7	Monitoreo y control de infiltraciones	2 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
6.1. Marco normativo de calidad de agua y su relación con depósitos de relaves. 6.2. Flujo de agua en el subsuelo. 6.3. Unidades hidrogeológicas. 6.4. Monitoreo y control de infiltraciones.		El/la estudiante: 1. Establece la relación entre el marco normativo chileno con relación a las infiltraciones desde depósitos de relaves. 2. Relaciona los reportes y límites de emisión de aguas contaminantes desde depósitos de relaves con el desarrollo de operaciones de disposición de relaves. 3. Analiza la noción de estabilidad química considerando su relación con las posibles redes de flujo existentes bajo el depósito de relave. 4. Identifica la infraestructura y la instrumentación empleada para monitorear aguas efluentes desde los depósitos de relaves, junto con los procesos necesarios para mitigar o eliminar los efectos de infiltraciones. 5. Analiza el monitoreo de aguas subterráneas y superficiales asociadas a infiltraciones de aguas de relaves. 6. Identifica métodos de contención y manejo de infiltraciones.	

	<p>7. Analiza casos en Chile de monitoreo y control de infiltraciones.</p> <p>8. Organiza con su equipo el trabajo sobre el análisis de un caso o investigación bibliográfica y en la elaboración de un informe de avance, considerando roles y tareas, los tiempos de trabajo asignados, así como el nivel de involucramiento en la toma de decisiones sobre la propuesta y el apoyo a otros integrantes del grupo.</p> <p>9. Redacta, de manera colaborativa con su equipo, un informe de avance sobre un tema de investigación o análisis bibliográfico, utilizando las convenciones de la comunicación profesional (lenguaje objetivo, claro, preciso).</p>
Bibliografía de la unidad	<p>[D.S. N°46 (2003)]</p> <p>[D.S. N°90 (2001)]</p> <p>[Blight (2010)]</p>

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
7	RA3, RA4	Tratamiento de relaves y agua para uso de terceros	2 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
<p>7.1. Remediación de depósitos de relaves.</p> <p>7.2. Opciones de reutilización de materia sólida.</p> <p>7.3. Opciones para el tratamiento y reutilización de agua de relaves en la gran minería chilena.</p>		<p>El/la estudiante:</p> <ol style="list-style-type: none"> Identifica las opciones más importantes para la neutralización de los efectos contaminantes de largo plazo asociados a depósitos de relaves Determina en el contexto de los niveles de producción de la minería chilena, las posibilidades y desafíos relacionados con recuperación de minerales y reutilización de materiales presentes en los depósitos de relaves, así como el tratamiento de aguas recuperadas desde los relaves con fines distintos de su recirculación en planta. 	
Bibliografía de la unidad		<p>[Lottermoser (2010)]</p> <p>[Edraki et al. (2014)]</p> <p>[Karaca et al. (2018)]</p> <p>[Kinnunen et al. (2022)]</p> <p>[Vitti et al. (2022)]</p>	

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
8	RA4, RA5, RA6, RA7	Gobernanza de depósitos de relaves	1 semana
Contenidos		Indicador de logro	
8.1. Relevancia del establecimiento de una gobernanza. 8.2. Guías y estándares internacionales asociados a gobernanza. 8.3. Casos de gobernanza de depósitos de relaves.		El/la estudiante: <ol style="list-style-type: none"> Identifica y analiza la importancia de la definición de una estructura de gobierno apropiada en la compañía minera para la toma de decisiones de diverso alcance con relación a la operación de depósitos de relaves. Identifica y analiza los aspectos diferenciadores en las guías de buenas prácticas y estándares más importantes en cuanto a gobernanza de depósitos de relaves. Reconoce y analiza la aplicación de ejemplos reales de esquemas de gobernanza en depósitos de relaves según el tamaño de las operaciones. Reporta en un informe final, con su equipo, los resultados de su investigación o análisis bibliográfico, utilizando en su escrito, las convenciones de la comunicación profesional (lenguaje objetivo, claro, preciso). Expone de forma clara, precisa y coherente los resultados de su trabajo de investigación o análisis bibliográfico, demostrando claridad, precisión y coherencia en la entrega de resultados de su análisis. Trabaja colaborativamente con su equipo en el reporte del proyecto del curso, considerando el cumplimiento de roles y tareas, así como el nivel de involucramiento en la toma de decisiones sobre el trabajo y el apoyo a otros integrantes del grupo. 	
Bibliografía de la unidad		[MI5170 (2023)]	

E. Estrategias de enseñanza-aprendizaje:

El curso considera las siguientes estrategias de enseñanza:

- Clases expositivas: donde se plantean aspectos conceptuales clave sobre aguas y relave (tratamiento, reutilización) los que se discutirán en cada sesión de trabajo.
- Resolución de ejemplos donde se trabaja con modelos de balances hídricos y energéticos relevantes para el curso
- Estudios de caso, a través de lecturas sobre ejemplos en Chile del manejo de agua y relave.
- Clase invertida, consistente en la revisión, por parte de los estudiantes, de material audiovisual preparado para el curso.

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
● Tarea.	Evalúa RA2 y RA3
*Proyecto de curso (informe de avance e informe final).	Evalúa RA1, RA2, RA3, RA4 y RA5
● Presentación final de curso.	Evalúa RA6

*El proyecto del curso está orientado al desarrollo de un tema de investigación que integre el conocimiento de tres o más unidades del curso. Dicha investigación puede corresponder a un estudio de caso o a una revisión bibliográfica asociada a una problemática específica relacionada con los objetivos del curso. Debe contener, como mínimo, las siguientes secciones:

- Introducción
- Objetivos del estudio (general y específicos)
- Metodología de trabajo
- Resultados y discusión
- Conclusiones
- Lista de referencias bibliográficas

El proyecto del curso se desarrollará según el siguiente cronograma:

- Semana 10: Elección de tema de proyecto de curso
- Semana 12: Informe de avance
- Semana 15: fin de la semana 15
- Fecha de examen: Presentación de proyecto de curso.

Las instrucciones de forma y fondo para el informe de avance y el informe final formarán parte del material docente del curso.

Respecto de la evaluación del proyecto del curso, se tendrá en cuenta una actividad de autoevaluación de los integrantes de los grupos, donde se consultará respecto de:

- El nivel apoyo a otros integrantes del grupo
- El grado de cumplimiento de tareas y roles asignados
- El nivel de involucramiento en la toma de decisiones
- La evaluación general del cumplimiento de objetivos.

Proyectos de estudios de factibilidad donde se analizan ventajas y desventajas de dichos proyectos.

La nota final del curso se calculará según la ponderación definida por los docentes.

G. Recursos bibliográficos:

Bibliografía principal:

- [1] Abulnaga, B. E. (2021). Slurry systems handbook (2nd ed.) McGraw-Hill, New York.
- [2] Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2004). *Geochemistry, groundwater and pollution*. CRC press.
- [3] Blight, G. (2010). *Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities*. CRC Press.
- [4] D.S. N°46 (2003) Norma chilena de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas
- [5] D.S. N°90 (2001) Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.
- [6] Edraki, M., Baumgartl, T., Manlapig, E., Bradshaw, D., Franks, D. M., & Moran, C. J. (2014). Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches. *Journal of Cleaner Production*, 84, 411-420.
- [7] Fourie, A. B. (2012). Perceived and realized benefits of paste and thickened tailings for surface deposition. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112(11), 919–926.
- [8] Fuerstenau, M. C., & Han, K. N. (2003). *Principles of mineral processing*. Littleton, CO: SME.
- [9] Global Tailings Review. (2020). *Global industry standard on tailings management*.
- [10] Ihle, C. F. & Valencia, P (2023). Long-distance slurry pipeline transport. In *SME Surface Mining Handbook*.
- [11] Karaca, O., Cameselle, C., & Reddy, K. R. (2018). Mine tailing disposal sites: contamination problems, remedial options and phytocaps for sustainable remediation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 17(1), 205-228.
- [12] Kinnunen, P., Karhu, M., Yli-Rantala, E., Kivikytö-Reponen, P., & Mäkinen, J. (2022). A review of circular economy strategies for mine tailings. *Cleaner Engineering and Technology*, 100499.
- [13] Lottermoser, B. (2010). *Mine wastes: characterization, treatment and environmental impacts*. Springer Science & Business Media.
- [14] MI5170 (2023). *Agua y Relaves*, apunte del curso.

- [15] Sernageomin. (2007). Decreto Supremo No 248 de 2007, del Ministerio de Minería.
- [16] Vitti, C., & Arnold, B. J. (2022). The reprocessing and revalorization of critical minerals in mine tailings. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 1–6.
- [17] Williams, D. (2016). Chapter 37 - Tailings Storage Facilities. In *Gold Ore Processing* (pp. 663–676). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00037-2>.

Bibliografía complementaria

- [18] Araya, N., Ramírez, Y., Kraslawski, A., & Cisternas, L. A. (2021). Feasibility of re-processing mine tailings to obtain critical raw materials using real options analysis. *Journal of Environmental Management*, 284, 112060.
- [19] Bulatovic, S., Wyslouzil, D. M., & Kant, C. (1999). Effect of clay slimes on copper, molybdenum flotation from porphyry ores. *Proceedings of Copper 1999 Conference*.
- [20] Codelco. Guía. GCR-03HGA-GUI-00002. Guía para Balance Hídrico de Depósito de Relaves. 2021.
- [21] Codelco. Estándar. GCR-03HGA-STD-00002. Estándar de Hidrología e Hidrogeología para Proyectos de Depósitos de Relaves y Depósitos en Operación. 2021.
- [22] Falagán, C., Grail, B. M., & Johnson, D. B. (2017). New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings. *Minerals Engineering*, 106, 71-78.
- [23] Mewis, J., & Wagner, N. J. (2012). *Colloidal suspension rheology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [24] Rao, F., & Liu, Q. (2015). Geopolymerization and its potential application in mine tailings consolidation: a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 36(6), 399-409.
- [25] Tanner, R. I. (2000). *Engineering rheology* (Vol. 52). Oxford University Press, USA.
- [26] Vick, Stephen, 1970. *Planning, design and analysis of Tailings Dams*
- [27] Wilson, K. C., Addie, G. R., Sellgren, A., & Clift, R. (2006). *Slurry transport using centrifugal pumps*. Chapman and Hall, London.
- [28] Yardley, E. D., & Stace, L. R. (2008). *Belt conveying of minerals*. Elsevier.

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

Vigencia desde:	Otoño, 2023
Elaborado por:	Christian Ihle
Validado por:	Académicos pares: Carlos Espinoza, Andreina García Validación CTD de Minas
Revisado por:	Área de Gestión Curricular