

## PROGRAMA DE CURSO

### HIDRÁULICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y APROVECHAMIENTO

#### A. Antecedentes generales del curso:

Departamento	Ingeniería Civil (DIC)					
Nombre del curso	Hidráulica de aguas subterráneas y aprovechamiento	Código	CI4262	Créditos	6	
Nombre del curso en inglés	<i>Groundwater hydraulics</i>					
Horas semanales	Docencia	3	Auxiliares	1,5	Trabajo personal	5,5
Carácter del curso	Obligatorio	X		Electivo		
Requisitos	CI4121: Ingeniería geotécnica, CI3262: Ingeniería hidráulica					

#### B. Propósito del curso:

Este es un curso introductorio que enfatiza los principios fundamentales que gobiernan al movimiento del agua en sistemas acuíferos. Algunos temas que se incluyen son: fundamentos geológicos para el estudio de aguas subterráneas, propiedades físicas del agua subterránea y de los acuíferos, ecuaciones fundamentales del flujo en medios permeables, captación de aguas subterráneas, análisis de pruebas de bombeo y modelación conceptual de sistemas acuíferos.

Al término del curso, el/la estudiante utilizan las leyes de la física aplicadas al movimiento del agua en medios permeables, para caracterizar, evaluar y usar sustentablemente las aguas subterráneas.

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

CE1: Concebir, formular y aplicar modelos para la resolución de problemas relacionados con obras y sistemas de ingeniería civil.

CE2: Interpretar y evaluar los métodos, herramientas y tecnologías utilizadas y sus resultados, siendo estas computacionales, experimentales, numéricas o analíticas, en la resolución de problemas asociados a obras y sistemas de ingeniería civil.

CEH6: Caracterizar y cuantificar la variabilidad temporal y espacial de la cantidad y calidad del recurso hídrico en el sistema terrestre, tanto para condiciones normales como extremas.

CEH7: Diseñar, analizar y evaluar proyectos de recursos hídricos y medio ambiente desde una perspectiva sistémica y sustentable, actual y futura, tanto en calidad como cantidad del recurso.

CEH8: Concebir, diseñar, implementar y operar obras de protección, captación, almacenamiento, tratamiento, conducción y distribución del recurso hídrico para distintos usos (riego, agua potable y residual, industrial, generación, minería, etc.), utilizando tanto tecnologías tradicionales como emergentes.

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 una variedad de textos e informaciones sobre temas concretos o abstractos, comunicando experiencias y opiniones, adecuándose a diferentes contextos y 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
CEH6	RA1: Relaciona conceptos y teorías fundamentales de la geología aplicables a las aguas subterráneas, considerando la clasificación y caracterización de los distintos tipos de roca y estructuras de la corteza terrestre, así como los procesos geológicos que los formaron.
CE1, CE2, CEH6	RA2: Utiliza las leyes de la física aplicadas al movimiento del agua en medios permeables, para formular, evaluar y aplicar modelos que permitan la resolución de problemas en aguas subterráneas.
CE2, CEH6, CEH7	RA3: Analiza datos de pruebas de bombeo en pozos tanto en régimen permanente como transiente, usando metodologías grafo-analíticas como numéricas, con el fin de estimar las propiedades hidráulicas de los acuíferos.
CEH8	RA4: Concibe, diseña e implementa un programa de perforación y análisis de acuíferos, considerando diversos métodos de perforación, normativa y regulación aplicable, tecnologías de monitoreo, costos de construcción en un presupuesto básico, tiempos de ejecución de trabajos, operarios y softwares de análisis.
CE1, CEH6	RA5: Modela conceptualmente sistemas acuíferos considerando resultados de estudios de prospección a la escala de terreno, los cuales incluyen geología, geofísica, geoquímica y monitoreo de pozos.
CE2, CEH7	RA6: Aplica herramientas de modelación analíticas y conceptuales para analizar y evaluar casos reales tales como recarga artificial (captación y almacenamiento) y geotermia de baja entalpía (uso del recurso hídrico).
Competencias genéricas	Resultados de aprendizaje
CG1, CG2	RA7: Interpreta la información de los mapas geológicos e hidrogeológicos en formatos digital, considerando simbologías propias de las ciencias de la Tierra, para evaluar las características y diferencias de cada zona de estudio.

CG3, CG5	RA8: Analiza, de forma reflexiva, el impacto de propuestas o proyectos de ingeniería ligados a recarga y geotermia de baja entalpía, considerando sus efectos sobre el medio natural, cultural y social.
----------	--

#### D. Unidades temáticas:

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
1	RA1, RA2, RA7	Fundamentos geológicos y físicos para la hidráulica de aguas subterráneas	3 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
<p>1.1. Elementos generales.</p> <p>1.1.1. Sistema Tierra: escalas de tiempo geológicas, interior de la Tierra, tectónica de placas.</p> <p>1.1.2. Estructuras de la corteza terrestre y procesos geológicos. Origen de la porosidad y permeabilidad.</p> <p>1.1.3. Aguas subterráneas y los problemas de escala.</p> <p>1.1.4. Sistemas acuíferos y clasificación.</p> <p>1.2. Parámetros físicos, mediciones y usos.</p> <p>1.2.1. Propiedades del agua y aire.</p> <p>1.2.2. Distribución de la humedad en el suelo.</p> <p>1.2.3. Propiedades de medios permeables y definición de volumen representativo (REV).</p> <p>1.2.4. Energía y carga hidráulica.</p> <p>1.2.5. Medición de carga, presión y niveles de agua.</p> <p>1.2.6. Uso de aguas subterráneas. Problemas de sobreexplotación, subsidencia, aprovechamiento energético, contaminación y otras aplicaciones.</p>		<p>El/la estudiante:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Describe la escala de tiempo geológica y las unidades geocronológicas.</li> <li>2. Identifica las capas internas de la Tierra y describe la teoría de tectónica de placas.</li> <li>3. Identifica las estructuras que componen la corteza terrestre y describe los procesos geológicos que ocurren en ella.</li> <li>4. Lee mapas geológicos para obtener información.</li> <li>5. Clasifica las formaciones geológicas en función de sus propiedades de almacenamiento y transmisividad.</li> <li>6. Describe las propiedades termodinámicas del agua y del aire.</li> <li>7. Identifica y calcula parámetros físicos tales como la porosidad efectiva y saturación, entre otros.</li> <li>8. Describe el volumen representativo (REV) y sus escalas de validez, comprendiendo la aproximación de los medios permeables como sistema continuo.</li> <li>9. Calcula cargas hidráulicas e identifica dispositivos para la medición de carga, presión y niveles de aguas en pozos.</li> <li>10. Describe los distintos usos de aguas subterráneas, distinguiendo algunas de las</li> </ol>	

	aplicaciones de estudio en diferentes problemas de Ingeniería Civil.
<b>Bibliografía de la unidad</b>	Bear, cap 2 and Delleur, cap 5 Freeze y Cherry, cap 2, 4 Fitts, cap 2 Domenico and Schwartz, cap 1 y 2

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
2	RA2	Modelación de aguas subterráneas	4,5 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
2.1. Ley de Darcy. 2.1.1. Ecuación de Darcy. 2.1.2. Conductividad hidráulica y permeabilidad. 2.1.3. Generalización de la Ley de Darcy. 2.1.4. Niveles equipotenciales y relación con el flujo. 2.1.5. Heterogeneidad y anisotropía. Refracción de las líneas de flujo. 2.1.6. Aproximación de Dupuit. Soluciones analíticas simples. 2.2. Balance de aguas subterráneas 2.2.1. Interacción entre cuerpos de agua superficiales y el subsuelo. 2.2.2. Curvas de recesión. 2.2.3. Recarga natural y artificial. 2.2.4. Evapotranspiración. 2.2.5. Modelo de balance general. 2.3. Leyes de conservación 2.3.1. Transporte de Reynolds. 2.3.2. Ecuación de conservación en zona saturada. Coeficientes de almacenamiento. 2.3.3. Ecuación de conservación en zona no saturada. Modelo de Van Genuchten. Infiltración.		El/la estudiante: 1. Identifica los parámetros físicos presentes en las ecuaciones de aguas subterráneas, reconociendo los rangos de validez de esas ecuaciones. 2. Comprende las definiciones de conductividad hidráulica y permeabilidad. 3. Dibuja líneas equipotenciales y flujos en 2D para distintos problemas de aguas subterráneas. 4. Reconoce la heterogeneidad y anisotropía como elementos relevantes en sistemas acuíferos y analiza sus efectos en las líneas de flujo. 5. Resuelve problemas analíticos simples y avanzados de aguas subterráneas. 6. Comprende los principales aspectos de la interacción entre acuíferos y cuerpos de agua superficiales, así como distintos temas de interés en el balance de aguas subterráneas. 7. Aplica el teorema de Transporte de Reynolds para derivar la ecuación de continuidad en medios permeables saturados y no saturados. 8. Aplica la ecuación de continuidad para estudiar problemas permanentes y transientes de aguas subterráneas.	

2.3.4. Soluciones analíticas avanzadas.	
<b>Bibliografía de la unidad</b>	<p>Bear, cap 3 a 7  Delleur, cap 5 y 6  Freeze y Cherry, cap 2, 5, 6, 7  Fitts, cap 3, 5, 6  Domenico and Schwartz, cap 3, 4 y 5</p>

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
3	RA2, RA3, RA4	Hidráulica de aguas subterráneas	4,5 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
<p>3.1. Ingeniería de pozos, monitoreo y normativa.</p> <p>3.1.1. Construcción, habilitación y mantención de pozos.</p> <p>3.1.2. Estratigrafía de pozos y perfiles geológicos simples.</p> <p>3.1.3. Tecnologías de monitoreo.</p> <p>3.1.4. Normativa chilena para aguas subterráneas.</p> <p>3.2. Hidráulica de pozos en régimen permanente.</p> <p>3.2.1. Acuíferos confinados/semiconfinados y libres</p> <p>3.2.2. Principio de superposición y condiciones de borde.</p> <p>3.2.3. Redes de flujo en acuíferos con velocidad uniforme.</p> <p>3.3. Hidráulica de pozos en régimen transiente.</p> <p>3.3.1. Pruebas de bombeo en acuíferos confinados/semiconfinados.</p> <p>3.3.2. Métodos de recuperación. Pérdidas de carga en pozos.</p> <p>3.3.3. Acuíferos libres y respuesta tardía.</p> <p>3.3.4. Slug tests. Método de Bouwer-Rice y ensayo Lefranc.</p> <p>3.3.5. Condiciones de borde inmersas y efectos en pruebas de bombeo.</p>		<p>El/la estudiante:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Describe las distintas técnicas de perforación existentes y tecnologías de monitoreo en pozos.</li> <li>Dibuja perfiles geológicos simples usando información de estratigrafía de pozos.</li> <li>Aplica la actual normativa chilena para la exploración y explotación de aguas subterráneas.</li> <li>Utiliza las ecuaciones de aguas subterráneas para modelar la extracción de agua subterráneas desde pozos de bombeo, usando distintas condiciones de borde e iniciales.</li> <li>Calcula parámetros hidráulicos a partir de pruebas de bombeo en régimen estacionario y transiente, usando soluciones de acuíferos ideales.</li> <li>Estima las pérdidas de carga en pozos de bombeo, usando métodos grafo-analíticos y numéricos.</li> <li>Determina la ubicación de condiciones inmersas (bordes equipotenciales e impermeables), usando métodos grafo-analíticos.</li> <li>Concibe, diseña e implementa un programa de perforación y análisis de acuíferos, para un problema simple de caracterización de aguas subterráneas.</li> </ol>	

<b>Bibliografía de la unidad</b>	<p>Bear, Cap 5, 8 y 11  Delleur, cap 9  Kruseman y Ridder, cap 3 a 6  Freeze y Cherry, cap 8  Fitts, cap 4, 8  Domenico and Schwartz, cap 6</p>
----------------------------------	---

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
4	RA5, RA6, RA7, RA8	Modelación conceptual y aplicaciones para el aprovechamiento de aguas subterráneas	3 semanas
<b>Contenidos</b>		<b>Indicador de logro</b>	
<p>4.1. Caracterización de acuíferos y modelación conceptual.</p> <p>4.1.1. Hidrogeofísica. Modelación geométrica de un acuífero.</p> <p>4.1.2. Hidrogeoquímica. Isotopía y trazadores.</p> <p>4.1.3. Monitoreo continuo en pozos.</p> <p>4.1.4. Mapas hidrogeológicos.</p> <p>4.1.5. Representación conceptual de sistemas acuíferos.</p> <p>4.2. Aplicaciones: Recarga artificial de acuíferos, geotermia de baja entalpía, otros.</p>		<p>El/la estudiante:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Describe distintas metodologías de prospección geofísica para la modelación geométrica de un acuífero.</li> <li>2. Interpreta información hidrogeoquímica para clasificar tipos de aguas, origen y procesos físico-químicos.</li> <li>3. Lee mapas hidrogeológicos para interpretar información.</li> <li>4. Usa datos de campo para crear modelos conceptuales de sistemas acuíferos.</li> <li>5. Aplica los conocimientos globales adquiridos en el curso para analizar problemas reales de aprovechamiento de aguas subterráneas.</li> </ol>	
<b>Bibliografía de la unidad</b>		<p>Fitts, cap 10, 12  Domenico and Schwartz, cap 9, 11, 12</p>	

### E. Estrategias de enseñanza -aprendizaje:

El curso considera las siguientes estrategias:

- Clases expositivas con participación de los y las estudiantes mediante actividades en aula.
- Análisis de casos y resolución de problemas.
- Trabajos prácticos individuales y grupales (tareas y otros)
- Salidas a terreno para el aprendizaje de usos de equipos de monitoreo en pozos (\*)

(\*) Se evaluará la factibilidad de realizar esta actividad al inicio del semestre.

### F. Estrategias de evaluación:

El curso podría considerar las siguientes instancias de evaluación:

Tipo de evaluación	Resultado de aprendizaje (RA) asociado a la evaluación
● Controles	Evalúa RA2, RA3, RA4
● Tareas y ejercicios	Evalúa RA1, RA2, RA3, RA4, RA5, RA7
● Examen	Evalúa RA2, RA3, RA5, RA6, RA7, RA8

*Al inicio del curso, el cuerpo académico a cargo informará sobre el tipo de evaluación a realizar, la cantidad y ponderaciones correspondientes.*

### G. Recursos bibliográficos:

#### Bibliografía obligatoria:

1. Bear, J. 1979. Hydraulics of Groundwater. McGraw-Hill.
2. Fitts, C. 2002. Groundwater Science. 1st ed. Academic Press.
3. Freeze, A. and J. Cherry. 1979. Groundwater. Prentice Hall.
4. Delleur, J. W. 2006. The handbook of Groundwater Engineering. CRC.
5. Kresic, N. 1997. Hydrogeology and groundwater modelling. CRC Press.
6. Kruseman, G. P. & N. A. Ridder. 1990. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. International Institute for Land Reclamation and Improvement.
7. Domenico, P. and F. Schwartz. 1997. Physical and Chemical Hydrogeology. 2nd ed. Wiley.



8. González, J. 2018. Apuntes de curso: Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento, Departamento de Ingeniería Civil, U. Chile.
9. Letelier, J. A. 2021. Apuntes del curso: Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento, Departamento de Ingeniería Civil, U. Chile

Recomendada:

10. Anderson, M., and W. Woessner. 1991. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press.
11. De Marsily, G. 1986. Quantitative Hydrogeology: Groundwater Hydrology for Engineers. Academic Press.
12. Yeh, T., Khaleel, R. and Carrol, K. C. 2015. Flow through heterogeneous geologic media. Cambridge University Press.
13. Tien-Chang, L. 1999. Applied Mathematics in Hydrogeology.
14. Todd, D. & L. Mays 2005. Groundwater Hydrology. John Wiley & Sons.
15. Batu, V. 1998. Aquifer Hydraulics: A Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis. Wiley-Interscience.
16. Bear, J. 1988. Dynamics of fluids in porous media. Dover Publications.
17. Chow, V.T., D. Maidment and L. Mays. 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill.
18. Driscoll, F. 1986. Groundwater and Wells. 2nd ed. Johnson Screens.
19. Fetter, C.W. 2000. Applied Hydrogeology. 4th ed. Prentice Hall.
20. Harr, M. 1992. Groundwater and Seepage. Dover Publications.
21. Schwartz, F. and H. Zhang. 2002. Fundamentals of Ground Water. Wiley.
22. Roscoe Moss Company 1990. Handbook of Ground Water Development.

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

Vigencia desde:	Otoño, 2022
Elaborado por:	Juvenal Letelier
Validado por:	Validación de pares académicos: Alberto de la Fuente Validación general académicos del área HSA
Revisado por:	Área de Gestión Curricular