



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
**Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental**

**FLUJO Y CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS (ICYA 4716)**  
**SEMESTRE I, 2022. SALON R-113**

**CARLOS MOLANO, [cmolano@uniandes.edu.co](mailto:cmolano@uniandes.edu.co)**

### **ANTECEDENTES**

Hoy en día el estudio del agua subterránea se ha convertido en un área fundamental en el ejercicio profesional de diversas disciplinas para un sinnúmero de aplicaciones. En el área de recursos hídricos desde el estudio y análisis para la captación de agua subterránea a través de un pozo, hasta el manejo de un campo de pozos, como en el Piedemonte Llanero, algunas zonas del Caribe (Sincelejo, San Andrés y Santa Marta, por ejemplo), el Valle del Cauca, ó la Sabana de Bogotá, y muchas zonas más, en donde se tienen cientos a miles de pozos interactuando entre sí, del cual dependen decenas de miles de usuarios, para abastecimiento de agua potable, para uso industrial y agrícola, aspectos indispensables para el sustento del ser humano, el desarrollo y la sostenibilidad de la economía de una región y del mismo país. Con el desarrollo intensivo de este recurso, de la industria, las prácticas agrícolas, el cambio del uso del suelo, comienza a interactuar el agua subterránea con el resto del medio ambiente, con diverso tipo de ecosistemas, de manera que su uso sostenible en condiciones ambientalmente sanas es crucial para garantizar que los bienes y servicios que este recurso nos ha brindado sigan disponibles tanto para las generaciones presentes como futuras. Además, el agua es esencial para la preservación del ser humano, para el desarrollo y sostenimiento socioeconómico, y para la preservación de diversos recursos naturales; es decir, necesitamos el agua para vivir y progresar, y para ser felices. De manera que siendo el agua subterránea el recurso de agua aprovechable mas abundante en la naturaleza, y de mayor uso a nivel mundial, es una necesidad y un deber de los profesionales de la hidrogeología, hacer que se aproveche en forma eficiente y sostenible.

El campo de acción de los profesionales del agua subterránea es muy diverso: para abastecimiento de agua (como se describió anteriormente), incluyendo ingenieros civiles, geólogos, hidrólogos, profesionales de ciencias de la tierra, planificadores, economistas, geógrafos, etc. En evaluación ambiental de sitios contaminados, y remediación de suelos y aguas subterráneas, se interactúa con otras disciplinas como las ciencias ambientales, ingeniería química, biología, ecología, toxicología, epidemiología, derecho ambiental y social etc. Otros ecosistemas como los humedales, dependen en su mayor parte del agua subterránea, y en épocas de estiaje los cauces superficiales dependen del agua subterránea, de manera que su gestión es fundamental para la preservación del hábitat y de una gama muy amplia de subsistemas, teniendo un papel muy importante la ecohidrología, la biología e hidrogeología de la zona hiporreica, la vegetación riveriega, la arquitectura del paisaje, etc.; por otra parte, es una necesidad ambiental preservar los caudales mínimos ecológicos en los cauces superficiales, que dependen en su mayor parte del agua subterránea. En la industria minera, tanto para el drenaje de las zonas a minar como el impacto producido por el mismo drenaje, las zonas de disposición de materiales y de residuos, las presas de relaves es un campo muy amplio para todo tipo de profesionales del agua subterránea. En geotecnia de taludes y subsidencia de terrenos, el agua subterránea juega un papel muy importante, son cientos los pozos que han colapsado en nuestro país por problemas de subsidencia del terreno, como también el agrietamiento y colapso de edificaciones; algunas zonas de inundación se han originado también por problemas de este tipo. En la industria petrolera, tanto para el agua que se requiere para la exploración, explotación y proceso, como en la disposición de residuos líquidos y sólidos que pueden afectar el suelo y el agua subterránea. En la recuperación secundaria de hidrocarburos, y el aprovechamiento no convencional de hidrocarburos, como el fracturamiento hidráulico (fracking) se requiere evaluar muy bien las condiciones hidrogeológicas para prevenir la contaminación del agua subterránea. En geotermia desde almacenamiento de calor y frío en acuíferos a través de redes de tuberías enterradas y pozos someros domésticos, hasta plantas geotérmicas industriales para enfriamiento. Recientemente, la modelación de flujo y transporte en medios porosos está jugando un papel importante en ingeniería biomédica como el flujo de aire parcialmente saturado a través de los pulmones y filtración en riñones.

De manera que la hidrología e hidráulica subterránea, se ha convertido en un vínculo central entre una diversidad de disciplinas asociadas a la hidrogeología, como los recursos hídricos, las ciencias de la tierra, la ingeniería ambiental, la gestión y uso del suelo, la exploración y explotación de minerales y petróleo, la geotecnia, geotermia, arquitectura del paisaje, ecohidrología, ecología subsuperficial, ciencias biológicas, etc. No se espera que las otras disciplinas conozcan lo que la hidrogeología les puede ofrecer; es el profesional del agua subterránea quién debe entender y aprender las necesidades de las otras disciplinas.



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
**Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental**

**OBJETIVOS.** Este curso está dirigido al estudiante de los últimos semestres de Ingeniería Civil y Ambiental, Geociencias, a estudiantes de posgrado en Recursos Hidráulicos, Suelos y Geotecnia, y otras disciplinas conexas como, Ingeniería Química, Ciencias Biológicas, entre otras. Tiene como objetivo dar al estudiante los principios básicos de la hidrogeología, los conceptos y mecanismos que rigen el movimiento y almacenamiento de agua y constituyentes químicos en medios porosos. Se dan ejemplos reales y aplicaciones prácticas a que un profesional se puede ver enfrentado, dando soluciones y lineamientos a problemas de flujo y contaminación de aguas subterráneas, no solamente teniendo en cuenta los cálculos analíticos y numéricos, sino incluyendo la interrelación de la Hidrogeología con el resto del medio ambiente.

**1. Introducción. Importancia del Agua Subterránea en Colombia y en el Mundo. (semana 1)**

**2. Conceptos generales. Elementos de Geología. (semana 1)**

- Principios de modelación analítica y numérica
- Tipos de acuíferos. Ley Darcy

**3. Flujo y transporte advectivo estacionario en una dimensión (Semana 1 y 2)**

- Flujo en acuíferos confinados
- Flujo en acuíferos libres
- Flujo en acuíferos semiconfinados
- Flujo en acuíferos heterogéneos
- Condiciones de frontera: carga hidráulica constante, gradiente o flujo constante, gradiente o flujo dependiente de la carga hidráulica. Tratamiento de manantiales, drenes y cauces superficiales.
- Rastreo de partículas. Aplicación en flujo, transporte advectivo y evaluaciones de riesgo ambiental Fase I y II
- Simulación numérica. Aplicación en sostenibilidad de ecosistemas dependientes del Agua Subterránea, incluyendo cambio climático y/o cambio de uso del suelo.
- Aproximación de intrusión de agua del mar en acuíferos costeros.

**4. Flujo y transporte advectivo estacionario en dos dimensiones (Semana 3)**

- Redes de flujo
- Simulación numérica
- El problema dual en modelación de las funciones de carga hidráulica y flujo. Aplicaciones en flujo y contaminación
- Análisis de sistemas de flujo (regional, intermedio, local)
- Aplicaciones en protección ambiental, eco-hidrología, vulnerabilidad y riesgo

**5. Flujo transitorio unidimensional y bidimensional (semana 4)**

- Soluciones analíticas unidimensionales
- Soluciones numéricas en una y dos dimensiones

**6. Flujo estacionario radial (semana 5)**

- Acuíferos confinados
- Acuíferos libres
- Acuíferos semiconfinados
- Pérdidas de carga hidráulica en pozos de bombeo
- Convolución y principio de superposición
- Rastreo inverso de partículas. Aplicación a delimitación de zonas de captura, zonas de protección ambiental e hidrogeología forense

**7. Flujo transitorio radial y pruebas de bombeo (semana 6)**

- Acuíferos confinados
- Acuíferos semiconfinados
- Acuíferos libres
- Convolución y pruebas a caudal variable. Pruebas escalonadas
- Pruebas en pozos de gran diámetro (aljibes)
- Localización hidráulica de fronteras hidrogeológicas
- Análisis de derivadas (pruebas y gráficas diagnóstico)



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
**Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental**

**8. Diseño de pozos de bombeo y monitoreo (Semana 6-7)**

- Diseño hidráulico y mecánico de Pozos de Bombeo
- Diseño de piezómetros y pozos de monitoreo
- Pruebas por pulsos (slug)

**9. Transporte de constituyentes químicos en medios porosos. (Semana 8)**

- Transporte advectivo y dispersivo
- Soluciones analíticas en una dimensión
- Soluciones numéricas en una dimensión
- Soluciones analíticas y numéricas en dos dimensiones
- Modelación de transporte 1D y 2D por caminata al azar
- Soluciones analíticas en tres dimensiones
- Aplicaciones en simulación y evaluación de riesgo ambiental

**10. El agua subterránea y la geotecnia (Semana 9)**

- Subsistencia de terrenos
- Estabilidad de Taludes

**11. Principios de hidrogeoquímica. (Semana 10)**

- Diagramas de Piper, Stiff, Shoeller, de cajas,
- Isótopos ambientales y radioactivos

**12. Principios de flujo multifase (semana 10-11)**

- Flujo en acuíferos costeros
- Flujo con densidad variable

**13. Gestión, Vulnerabilidad, Riesgo, Remediación, Hidrogeología forense (semana 11-12)**

- Vulnerabilidad GOD, AVI, DRASTIC
- Principios de análisis de riesgo
- Ejemplos de remediación e Hidrogeología Forense
- Índices de gestión: estrés hídrico subterráneo, agotamiento, reservas aprovechables.

**14. Principios de flujo y transporte en la zona no saturada (Semana 13)**

- Modelos analíticos
- Modelos numéricos

**15. Ejemplos de Modelos numéricos de uso corriente (Opcional)**

- MODFLOW
- FEFLOW

**16. Introducción a los elementos finitos en hidráulica subterránea (opcional)**

**17. Visita de campo (opcional)**

**18. Principios de transporte de calor (geotermia) en medios porosos (opcional)**

**19. Práctica de laboratorio (Visita y práctica opcional)**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
**Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental**

**Evaluaciones**

Trabajos y quizzes: 30%  
Exámenes parciales: 50%  
Examen final: 20%

**Revistas Periódicas:**

GROUND WATER JOURNAL	WATER WELL JOURNAL
GROUND WATER MONITORING REVIEW AND REMEDIATION	WATER RESOURCES RESEARCH
REVISTA LATINOAMERICANA DE HIDROGEOLOGÍA	ADVANCES OF WATER RESOURCES
ENVIRONMENTAL GEOLOGY	JOURNAL OF HYDROLOGY
CHEMICAL GEOLOGY	VADOSE ZONE JOURNAL
TRANSPORT IN POROUS MEDIA	STOCHASTIC HYDROLOGY AND HYDRAULICS
CONTAMINANT HYDROLOGY	HYDROGEOLOGIE
JOURNAL OF HYDROGEOLOGY	

**Libros de Referencia:**

Groundwater, 1979. R. Allan Freeze and John A. Cherry. Prentice-Hall. Englenwood Cliffs  
Applied Ground Water Modeling (2<sup>nd</sup> edition): Flow and advective transport. 2015. Mary P. Anderson, William W. Woessner y Randall J. Hunt 2015  
Physical and Chemical Hydrogeology. DOMENICO, P.A. y F.W. SCHWARTZ, 1997. Jhon, Willey & Sons, New York  
Fundamentals of Ground Water, 2002 by Franklin W. Schwartz and Hubao Zhang  
Ground Water and Wells, Driscoll, 1987.. Johnson.  
Groundwater Hydrology. 3<sup>rd</sup> Edition by David Keith Todd y Larry W. Mays  
Hydraulics of Groundwater, Jacob Bear. 1979. McGraw-Hill, New York  
Hydrogeology and Groundwater Modeling, Second Edition, 2006 by Neven Kresic  
Bioremediation and Natural Attenuation ALVAREZ PEDRO E ILLMAN WALTER. 2006.. Process fundamentals and Mathematical Models, New Jersey, Willey – Interscience.  
Hidrología Subterránea Emilio Custodio y Ramón Llamas. Ed. Omega. 1978  
Modeling Groundwater Flow and Polution. BEAR, J. Y A. VERRUIJT, 1987.. D. Reidel, Dordrecht.  
Introducción to Groundwater Hydraulics. BENNET, G. U.S. Geo. Surv. Book 7. 1.978  
Evaluación por análisis de pruebas de bombeo. KRUSEMAN,G. y N. DE RIDDER. 1970.. ILRI, Wageningen  
Groundwater Resource Evaluation WALTON,W. 1970.  
Groundwater Mechanics. STRACK, O.D.L., 1987. Prentice Hall, Eng. Cliffs, N.J.  
Theory of Groundwater Flow VERRUIJT,A., 1982., Mcmillan, London.  
Computational Methods in Subsurface Flow. HUYAKORN,P.S. y G.F. PINDER. 1983. Academic Press, New York.

**Otros Libros**

APPELO, C.A.J. y D.POSTMA, 1993., A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.  
ABRAMOWITZ,M. y STEGUN I.A.,1965.Hanbook of Mathematical Functions,Dover, New York.  
ANDERSON,M. y W. WOESNER, 2015 Ground Water Modeling (: Flow and advective transport.  
BEAR, J., 1.972. Dynamics of fluids in Porous Media, Elsevier, New York.  
BEAR, J. Y Y. BACHMAT, 1988 Introduction to Transport Phenomena in Porous Media,D. Reidel, Dordrecht .  
BOUWER, H. "Groundwater Hydrology". McGraw Hill. New York. 1.978  
DAGAN, G. 1990. Ground Water Flow and Transport.  
De WIEST R. "Geohydrology". Wiley. New York. 1.965  
DAVIS,S.N. Y R. DE WIEST. 1966 Hydrogeology, Wiley, New York.  
DE MARSILLY: Quantitative Hydrogeology  
ESCUELA DE INGENIEROS MILITARES. "Agua Subterránea y Perforación de Pozos". Escuela de Ingenieros Militares. Bogotá. 1.985  
FETTER, C.W.2001. Applied Hydrogeology. Prentice-Hall  
FETTER, C.W.1999. Contaminant Hydrogeology. Prentice Hall  
HARR, M. "Groundwater and Seepage". McGraw Hill. New York. 1.962  
HUISMANN, L. "Groundwater Recovery". McMillan. London. 1.972  
JAVANDEL, I., C.DOUGHTY y C.F. TSANG.1984. Groundwater Transport. Am. Geophys. Union, Washington.  
PINDER,G. y W. GRAY. Finite Elements in Surface and Subsurface Hydrology. Academic Press, New York.  
QUINTERO, J. "Hidráulica de Pozos". Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. (sin fecha)  
POLUBARINOVA-KOCHINA,P.YA., 1952. Theory of Groundwater Movement (en Ruso originalmente), Gotekhizdat, Moscu. Trad. Inglés R. de Wiest, Princenton, 1962.  
REMSON,I. G.M. HORNBERGER, Y F.J. MOLZ. 1971. Numerical Method in Subsurface Hydrology. Willey Int. New York.  
Zijl, W. and M. Nawalany. 1993. Natural Groundwater Flow. CRC Press.