



Fecha: DICIEMBRE 2021

PROGRAMA ACADÉMICO: INGENIERÍA GEOLÓGICA

SEMESTRE: X

ASIGNATURA: HIDROGEOLOGÍA AVANZADA

CÓDIGO: 8109032

NÚMERO DE CRÉDITOS: 3 (5 ECTS)

PRESENTACIÓN

El curso de hidrogeología avanzada está diseñado para presentar al estudiante los principios fundamentales, tanto intuitivos como matemáticos, de los modelos analíticos y numéricos de flujo de aguas subterráneas. Este curso comienza con un repaso de los conceptos de nivel piezométrico y Ley de Darcy, para luego dar paso a la derivación y entendimiento de las ecuaciones de flujo de agua en medio poroso y su solución tanto analítica como numérica. Este curso hace énfasis en la implementación de modelos numéricos de flujo en medio poroso usando la versión estudiantil del Software GMS. La implementación de estos modelos numéricos de flujo comienza con una descripción apropiada del problema a resolver, selección de las condiciones de frontera, asignación de los parámetros hidráulicos, calibración del modelo y presentación de resultados.

JUSTIFICACIÓN

Los modelos numéricos de flujo de agua en medio poroso son una herramienta esencial para el análisis cuantitativo del flujo de agua en acuíferos. Los modelos numéricos de flujo en hidrogeología permiten determinar la distribución espacial y/o temporal de los niveles piezométricos en un acuífero, los cuales por razones técnicas no se pueden medir en toda la extensión del mismo. Esta información es de vital importancia para el cálculo del balance hídrico y/o balance de masa, caudales, velocidades y direcciones de flujo del agua subterránea dentro del acuífero; así como su interacción con cuerpos de aguas superficiales

El aprovechamiento de los recursos hídricos y en particular del agua subterránea demanda el conocimiento de la hidrogeología y la implementación de modelos numéricos de flujo. Con estos es posible evaluar escenarios sobre el comportamiento del acuífero ante posibles cambios o perturbaciones tanto naturales (sequía, cambio climático, reducción de la recarga) como artificiales (incremento en la extracción).

El estudiante podrá aplicar este conocimiento en el desarrollo de la carrera y en la vida profesional.

COMPETENCIAS

Al final de este curso el estudiante estará en capacidad de realizar las siguientes actividades

- Entender el concepto de nivel piezométrico del agua subterránea en un acuífero con el fin de poder realizar mediciones del mismo en condiciones de campo.
- Aplicar la Ley de Darcy en la solución de problemas básicos de flujo de agua en medio poroso
- Entender las ecuaciones de flujo de agua en medio poroso en 2D y 3D, incluyendo las suposiciones simplificadoras realizadas en la derivación de las mismas.
- Desarrollar modelos hidrogeológicos conceptuales de acuíferos incluyendo sus condiciones de frontera
- Entender la organización básica de un modelo de MODFLOW
- Seleccionar los paquetes de MODFLOW apropiados para poder implementar un modelo numérico de flujo que represente el modelo hidrogeológico conceptual definido anteriormente
- Seleccionar el método de solución de los sistemas lineales de ecuaciones más apropiado para el



modelo numérico de flujo implementado y resolver los problemas de estabilidad y convergencia más comunes que se presentan

- Crear, organizar e importar información geo científica en un Sistema de Información Geográfica como herramienta fundamental para definir la información de entrada para la definición de modelos numéricos de flujo en GMS.
- Crear/Implementar un modelo numérico de flujo en medio poroso a través de un proyecto de GMS
- Calibrar modelos numéricos de flujo de agua en medio poroso usando las metodologías manuales y automáticas (PEST) en GMS.

RESULTADOS DE APRENDIZAJE

RA1. Explica la terminología y los conceptos de la hidrogeología y la hidráulica subterránea asociados a la circulación y almacenamiento de agua subterránea en los diferentes tipos de acuíferos.

RA2. Reconoce las particularidades en el comportamiento de los acuíferos en función de su litología y otros condicionantes.

RA3. Distingue los tipos de roca en las que se forman acuífero para evaluar su calidad en relación a su porosidad y conductividad hidráulica.

RA4. Aplica operaciones de cálculos y manejo de software para calcular diferentes parámetros hidrodinámicos, de almacenamiento y recarga a fin de permitir la evaluación y gestión sobre un acuífero estudiado en condiciones naturales o de explotación

RA5. Distingue los principales procesos que regulan la distribución y movilidad de los recursos hídricos para resolver problemas con relación al origen, funcionamiento y explotación de acuíferos.

RA6. Evalúa información de pozos, mapas topográficos, nivel freático e información de Sistemas de Información Geográfica para calcular diferentes parámetros hidrodinámicos como velocidades de flujo de zona y dirección de aguas subterráneas.

METODOLOGÍA

La metodología para esta asignatura establece la utilización de ayudas audiovisuales, conferencias, estudios de casos reales, ejercicios individuales de hidrología básica, hidrogeología, interpretación de mapas geológicos e hidrogeológicos, reconocimiento exploratorio de acuíferos para abordar la exploración de aguas subterráneas, identificando criterios básicos para la evaluación de zonas promisorias para el aprovechamiento de los recursos hídricos.

Clases magistrales – Lecturas previas – Talleres – Practicas – Tutorías.

INVESTIGACIÓN

El estudiante debe tener los conceptos de Cálculo diferencial e integral, Mecánica de Fluidos, Estratigrafía y sedimentología, Geología Estructural e Hidrogeología. Así mismo se requiere que el estudiante tenga conocimientos básicos de informática aplicada y Sistemas de Información Geográfica. En las sesiones teóricas presentaran resultados recientes de investigación tanto publicada en revistas especializadas como la realizada en la Escuela sobre la hidrogeología de la parte central de Boyacá.

MEDIOS AUDIOVISUALES

Utilización de ayudas audiovisuales (video beam)

Utilización de software especializados (GMS – Groundwater Modeling System, QGIS, ArcGIS, Excel, R).

EVALUACIÓN

EVALUACIÓN COLECTIVA

- Taller sobre modelos hidrogeológicos conceptuales en GMS.
- Taller sobre definición de condiciones de frontera en GMS.
- Taller sobre asignación de parámetros hidráulicos en GMS



- Taller sobre calibración de modelo numérico de flujo en GMS (PEST).
- Taller sobre modelos de flujo no-estacionarios en GMS.

EVALUACIÓN INDIVIDUAL

Parcial en cada corte del 50%

CONTENIDOS TEMÁTICOS MÍNIMOS

Unidad 1. INTRODUCCIÓN

Unidad 2. NIVEL PIEZOMÉTRICO

Unidad 3. LEY DE DARCY. INTRODUCCIÓN, CAPAS, 2D-3D.

Unidad 4. ECUACIONES DE FLUJO. CONSERVACIÓN DE MASA. DERIVACIÓN.

Unidad 5. MÉTODOS NUMÉRICOS. DIFERENCIAS FINITAS.

Unidad 6. SOLUCIÓN DE SISTEMAS LINEALES DE ECUACIONES. MÉTODOS DIRECTOS E ITERATIVOS.

Unidad 7. GEOESTADÍSTICA. SEMIVARIOGRAMAS. KRIGING

Unidad 8. INTRODUCCIÓN AL GMS. EJEMPLOS DE MODELOS NUMÉRICOS DE FLUJO.

Unidad 9. MODELOS HIDROGEOLÓGICOS CONCEPTUALES. CONCEPTOS BÁSICOS.

Unidad 10. CONDICIONES DE FRONTERA. LÍMITES DE NIVEL CONSTANTE, FLUJO CONSTANTE, NO FLUJO. RÍOS. RECARGA

Unidad 11. CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA. INTRODUCCIÓN AL PEST.

Unidad 12. MODELO DE TRANSPORTE ADVECTIVO.

Unidad 13. MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO.

LECTURAS MÍNIMAS

Hunt, R.J., Doherty, J., Tonkin, M.J., 2007. ¿Are models too simple? Arguments for increased parameterization. Groundwater 45 (3), 254-261. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00316.x>.

Hunt, R.J., Zheng, C., 2012. The current state of modeling. Groundwater 50 (3), 329-333. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00936.x>.

Haitjema, H., 2006. The role of hand calculations in ground water flow modeling. Groundwater 44 (6),786-791. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00189.x>.

Gusyev, M.A., Haitjema, H.M., Carlson, C.P., Gonzalez, M.A., 2013. Use of nested flow models and interpolation techniques for science-based management of the Sheyenne National Grassland, North Dakota, USA. Groundwater 51 (3), 414-420. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00989.x>.

Hassan, A.E., 2004a. Validation of numerical ground water models used to guide decision making. Groundwater 42 (2), 277-290. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2004.tb02674.x>.

Hassan, A.E., 2004b. A methodology for validating numerical ground water models. Groundwater 42 (3), 347-362. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2004.tb02683.x>.

Hsieh, P.A., 2011. Application of MODFLOW for oil reservoir simulation during the Deepwater Horizon crisis. Groundwater 49 (3), 319-323. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2011.00813.xs>.

Clement, T.P., 2011. Complexities in hindcasting modelsdWhen should we say enough is enough? Groundwater 49 (5), 620-629. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2010.00765.x>.

Kelson, V.A., Hunt, R.J., Haitjema, H.M., 2002. Improving a regional model using reduced complexity and parameter estimation. Groundwater 40 (2), 132-143. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2002.tb02498.x>.



Fienen, M.N., D'Oria, M., Doherty, J.E., Hunt, R.J., 2013. Approaches in Highly Parameterized Inversion: BgaPEST, a Bayesian Geostatistical Approach Implementation with PEST. U.S. Geological Survey. Techniques and Methods Report 7(C9), 86 p. <http://pubs.usgs.gov/tm/07/c09/>.

Welter, D.E., Doherty, J.E., Hunt, R.J., Muffels, C.T., Tonkin, M.J., Schre€uder, W.A., 2012. Approaches in Highly Parameterized Inversion dPESTpp, a Parameter ESTimation Code Optimized for Large Environmental Models. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 7(C5), 47 p. <http://pubs.usgs.gov/tm/tm7c5/>.

BIBLIOGRAFÍA E INFOGRAFÍA

Freeze A. Cherry J. Groundwater. Ed. Prentice Hall. 1979. New Jersey, USA.

Fetter. Applied Hidrogeology. Ed. Prentice Hall. 2001. New Jersey, USA

Domenico & Schwartz. Physical and Chemical Hydrogeology. Second Edition. 1998. John Wiley and Sons. USA

Custodio Llamas. Hidrología de aguas subterráneas. Ed. Omega. 1986. Barcelona.

Jhonson Division. Los pozos y el agua subterránea.

Pimienta, J. La captación de aguas subterráneas.

Price Michael. Aguas subterráneas.

Quintero Jorge. Análisis sobre pruebas de bombeo. 1975. Universidad Nacional.

Ven Te Chow- David R. Maidment. Hidrología aplicada.

Villela Marcondes S Y Mattos A. Hidrogeología aplicada.

Bardelli, H. Aguas subterráneas.

Mary P. Anderson & William W. Woessner & Randall J. Hunt. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Second Edition. 2015. Academic Press.

Jacob Bear & Alexander H.-D. Cheng. Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport. 2010. Springer Verlag, Germany.

Wen-Hsing Chiang & Wolfgang Kinzelbach. 3D-Groundwater Modeling With PMWIN: A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Transport Processes. Second Edition. 2005. Springer Verlag.

Agnes Sachse & Karsten Rink & Wenkui He & Olaf Kolditz. OpenGeoSys-Tutorial: Computational Hydrology I: Groundwater Flow Modeling. 2015. Springer Verlag.



DESCRIPCIÓN ANALÍTICA DE CONTENIDOS

UNIDAD 1. INTRODUCCIÓN	
CONTENIDO <ul style="list-style-type: none"> Entender las diferencias entre Modelos físicos, matemáticos y numéricos. Modelos numéricos de flujo. Casos de estudio. 	COMPETENCIAS DERIVADAS PARA UNIDADES <ul style="list-style-type: none"> Objetivo alcance del tema. Desarrollo de modelos numéricos de flujo en hidrogeología. Breve recuento histórico.
ACTIVIDAD PRESENCIAL: 4 horas	INDEPENDIENTE: 2 horas
Clase magistral: 3 Tutoría: 1	Lecturas previas: 2

UNIDAD 2. NIVEL PIEZOMÉTRICO	
CONTENIDO <ul style="list-style-type: none"> Utilizar los principios y conceptos básicos de la ecuación de energía de un fluido. Entender el concepto de nivel piezométrico y como se puede medir en campo 	COMPETENCIAS DERIVADAS PARA UNIDADES <ul style="list-style-type: none"> Energía mecánica de un fluido. Ecuación de Bernoulli. Nivel piezométrico como medida de la energía de un fluido por unidad de peso.
ACTIVIDAD PRESENCIAL: 11 horas	INDEPENDIENTE: 5 horas
Clase magistral: 6 Practica: 2 Tutoría: 3	Lecturas previas: 3 Informe Practica: 2

UNIDAD 3. LEY DE DARCY	
CONTENIDO <ul style="list-style-type: none"> Entender las variables que definen la Ley de Darcy: conductividad hidráulica y gradiente hidráulico 	COMPETENCIAS DERIVADAS PARA UNIDADES <ul style="list-style-type: none"> Componentes de la ecuación del caudal que atraviesa una sección de acuífero. Gradiente hidráulico. Conductividad hidráulica. Cálculo del caudal del agua subterránea a través de una sección de acuífero. Ley de Darcy en 2D y 3D. Cálculo de la velocidad del agua subterránea en el acuífero.
ACTIVIDAD PRESENCIAL: 5 horas	INDEPENDIENTE: 4 horas
Clase magistral: 4 Tutoría: 1	Lecturas previas: 2 Trabajo: 2

UNIDAD 4. ECUACIONES DE FLUJO	
CONTENIDO <ul style="list-style-type: none"> Interpretar de manera física los términos de la ecuación de flujo de agua en medio poroso Comprender la relación entre 	COMPETENCIAS DERIVADAS PARA UNIDADES <ul style="list-style-type: none"> Principio de conservación de Masa. Serie de Taylor Derivación de las ecuaciones de flujo de agua subterránea en medio poroso usando la Ley de Darcy y el principio de conservación de masa.



MACROPROCESO: DOCENCIA
PROCESO: GESTIÓN DE PROGRAMAS ACADÉMICOS
PROCEDIMIENTO: FORMULACION O ACTUALIZACION DEL PROYECTO ACADEMICO EDUCATIVO-PAE PARA PROGRAMAS DE PREGRADO
CONTENIDOS PROGRAMATICOS PROGRAMAS DE PREGRADO

Código: D-GPA-P01-F02	Versión: 02	
------------------------------	--------------------	--

<p>los parámetros hidráulicos de la ecuación de flujo de agua en medio poroso en 2D y 3D.</p>	<ul style="list-style-type: none">• Parámetros hidráulicos: Conductividad hidráulica vs Transmisividad, Almacenamiento específico vs Coeficiente de Almacenamiento
---	--

ACTIVIDAD PRESENCIAL: 7 horas	INDEPENDIENTE: 3 horas
Clase magistral: 4 Practica de campo: 1 Tutoría: 2	Lecturas previas: 1 Informe practica: 2

UNIDAD 5. MÉTODOS NUMÉRICOS

CONTENIDO <ul style="list-style-type: none">• Comprender el método de las diferencias finitas mediante la discretización de la ecuación de flujo de agua en medio poroso	COMPETENCIAS DERIVADAS PARA UNIDADES <ul style="list-style-type: none">• Serie de Taylor y Diferencias Finitas.• Discretización de las ecuaciones de flujo usando diferencias finitas.
---	--

ACTIVIDAD PRESENCIAL: 9 horas	INDEPENDIENTE: 5 horas
Clase magistral: 6 Tutoría: 3	Lecturas previas: 3 Taller: 2

UNIDAD 6. SOLUCIÓN DE SISTEMAS LINEALES DE ECUACIONES

CONTENIDO <ul style="list-style-type: none">• Establecer las diferencias entre los diferentes métodos de solución de sistemas lineales de ecuaciones de tipo directo e iterativos	COMPETENCIAS DERIVADAS PARA UNIDADES <ul style="list-style-type: none">• Solución de sistemas lineales de ecuaciones usando métodos directos: Eliminación gaussiana.• Solución de sistemas lineales de ecuaciones usando métodos iterativos básicos: Gauss-Seidel y Jacobi.• Solución de sistemas lineales de ecuaciones usando métodos iterativos avanzados: Gradiente Conjugado, Métodos Multimalla, Métodos de Subespacios de Krylov
--	--

ACTIVIDAD PRESENCIAL: 6 horas	INDEPENDIENTE: 4 horas
Clase magistral: 4 Tutoría: 2	Lecturas previas: 2 Taller: 2



UNIDAD 7 GEOESTADÍSTICA

CONTENIDO	COMPETENCIAS DERIVADAS PARA UNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> Establecer las diferencias entre interpolación y estimación espacial como herramienta para la construcción de mapas de parámetros hidráulicos 	<ul style="list-style-type: none"> Fundamentos de análisis exploratorio de datos Interpolación espacial vs Estimación espacial. Interpolación Espacial: Inverso de la distancia ponderada Análisis de la estructura espacial de la información: semivariogramas. Estimación Espacial: Krigueaje.
ACTIVIDAD PRESENCIAL: 12 horas	INDEPENDIENTE: 5 horas
Clase magistral: 7 Practica de campo: 2 Tutoría: 3	Lecturas previas: 2 Informa practica: 3

UNIDAD 8 INTRODUCCIÓN AL GMS

CONTENIDO	COMPETENCIAS DERIVADAS PARA UNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> Conocer la estructura de un proyecto de MODFLOW a través de los diferentes paquetes especializados que permiten especificar condiciones de frontera, fuentes/sumideros y rasgos hidrogeológicos. Implementar modelos numéricos en el software GMS. 	<ul style="list-style-type: none"> Introducción al MODFLOW Estructura del MODFLOW Principales Paquetes del MODFLOW Introducción a la interface de GMS
ACTIVIDAD PRESENCIAL: 11 horas	INDEPENDIENTE: 5 horas
Clase magistral: 6 Practica: 2 Tutoría: 3	Lecturas previas: 3 Informe practica: 2

UNIDAD 9. MODELOS HIDROGEOLÓGICOS CONCEPTUALES

CONTENIDO	COMPETENCIAS DERIVADAS PARA UNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> Entender las principales características de un modelo hidrogeológico conceptual. 	<ul style="list-style-type: none"> Definición y características generales de los modelos hidrogeológicos conceptuales Componentes de un modelo hidrogeológico conceptual Incertidumbre en los modelos hidrogeológicos conceptuales Errores comunes en los modelos hidrogeológicos conceptuales
ACTIVIDAD PRESENCIAL: 6 horas	INDEPENDIENTE: 3 horas
Clase magistral: 4 Tutoría: 2	Lecturas previas: 2 Taller: 1



UNIDAD 10 CONDICIONES DE FRONTERA

CONTENIDO	COMPETENCIAS DERIVADAS PARA UNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> Identificar los diferentes tipos de condiciones de frontera de un modelo numérico de flujo de agua en medio poroso y determinar el tipo de información geológica e hidrológica necesaria para esta identificación 	<ul style="list-style-type: none"> Tipos de condiciones de frontera Especificación en modelos numéricos
ACTIVIDAD PRESENCIAL: 6 horas	INDEPENDIENTE: 2 horas
Clase magistral: 4 Tutoría: 2	Lecturas previas: 2

UNIDAD 11. CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA

CONTENIDO	COMPETENCIAS DERIVADAS PARA UNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> Conocer los principios fundamentales del proceso de calibración de un modelo numérico de flujo de agua en medio poroso 	<ul style="list-style-type: none"> Problema directo vs problema inverso Estimación manual de parámetros Estimación automática de parámetros Introducción a PEST
ACTIVIDAD PRESENCIAL: 6 horas	INDEPENDIENTE: 4 horas
Clase magistral: 4 Tutoría: 2	Lecturas previas: 2 Taller: 2

UNIDAD 12. MODELO DE TRANSPORTE ADVECTIVO

CONTENIDO.	COMPETENCIAS DERIVADAS PARA UNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> Conocer los conceptos fundamentales del procedimiento de trazado de partículas como herramienta para el modelamiento del transporte advectivo en acuíferos usando el software GMS 	<ul style="list-style-type: none"> Interpolación de velocidad Métodos de definición de rutas de partículas Fuentes débiles Programas
ACTIVIDAD PRESENCIAL: 6 horas	INDEPENDIENTE: 4 horas
Clase magistral: 4 Tutoría: 2	Lecturas previas: 2 Taller: 2



MACROPROCESO: DOCENCIA
PROCESO: GESTIÓN DE PROGRAMAS ACADÉMICOS
PROCEDIMIENTO: FORMULACION O ACTUALIZACION DEL PROYECTO ACADÉMICO EDUCATIVO-PAE PARA PROGRAMAS DE
PREGRADO
CONTENIDOS PROGRAMATICOS PROGRAMAS DE PREGRADO

Código: D-GPA-P01-F02

Versión: 02

Página 9 de 9

UNIDAD 13. MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO

CONTENIDO

- Entender la formulación de un problema de manejo de recurso hídrico subterráneo y emplear procedimientos básicos de optimización para su correspondiente solución.

COMPETENCIAS DERIVADAS PARA UNIDADES

- Casos de estudio de manejo de recurso hídrico con modelos numéricos de flujo
- Introducción a la optimización

ACTIVIDAD PRESENCIAL: 6 horas

INDEPENDIENTE: 4 horas

Clase magistral: 4
Tutoría: 2

Lecturas previas: 2
Taller: 2