



INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS
San José, Costa Rica
Apartado 1097-1200. Teléfono 2242-6516. vramos@aya.go.cr

MEMORANDO

PARA: Oscar Izquierdo Sandí
Cooperación y Asuntos Internacionales

FECHA: 31 de marzo de 2020

Yamileth Astorga Espeleta
Presidencia Ejecutiva

DE: Christian Corrales Díaz
Área Funcional de Hidrogeología

No. UEN-GA-2020-01115

ASUNTO: Participación en Actividad: Modelación Matemática de Acuíferos del 02 de marzo al 05 de marzo del 2020 en Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.

En cumplimiento con lo establecido mediante Resolución de la Presidencia Ejecutiva PRE-R-2020-003, relacionado a la Modelación Matemática de Acuíferos del 02 de marzo al 05 de marzo del 2020 llevada a cabo en Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, se hace entrega del respectivo informe para su conocimiento.

Viviana Ramos Sánchez
Directora UEN Gestión Ambiental

C: Florentino Fernández Venegas, Subgerencia Ambiental, Investigación y Desarrollo
Christian Corrales, UEN Gestión Ambiental
Christian Delgado Segura, UEN Gestión Ambiental
Rodhe Baez Espinoza, Cooperación y Asuntos Internacionales
Archivo 334



**INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y
ALCANTARILLADOS**

AREA FUNCIONAL DE HIDROGEOLOGÍA

UEN GESTIÓN AMBIENTAL



**INFORME DE VIAJE AL EXTERIOR
DEL 02 DE MARZO AL 05 DE MARZO DE 2020**

Curso: “MODELACIÓN MATEMÁTICA DE ACUÍFEROS”

FECHA: 31 de MARZO de 2020

1. FICHA INFORMATIVA

País y ciudad visitado: Santa Cruz de la Sierra, Bolivia

Fecha de la visita: 02 de marzo de 2020 al 05 de marzo de 2020

Funcionario de misión AyA: Geól. Christian Corrales Díaz.

Motivo del viaje: Participación en el curso: "Modelación Matemática de Acuíferos "

Contacto en el lugar de misión:

Dra. Marcela Pérez

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fé, Argentina.

Correo-e: perezmarcelaa@gmail.com

Dra. Marta París (Coordinación)

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fé, Argentina.

Correo-e: parismarta@gmail.com

Licda. Lucia Samaniego

Centro Regional para la Gestión de las Aguas Subterráneas en América Latina y el Caribe (CeReGas)

2. INTRODUCCIÓN

La Agencia de Cooperación Española (AECID), La Conferencia Iberoamericana de Directores de Agua (CODIA), y la Red de América Latina de Centros de Excelencia en Gestión del Agua - RALCEA, organizan en conjunto el Modelación Matemática de Acuíferos, en la Sede de la AECID en Santa Cruz de La Sierra, Bolivia, desarrollado entre los días 02 de marzo y 05 de marzo del 2020.

3. OBJETIVOS

- General:

Enfocar y desarrollar la modelación matemática de acuíferos como herramienta en la gestión sostenible del agua, a través del planteamiento de un modelo hidrogeológico numérico que represente el comportamiento del agua en el acuífero y el transporte de sustancias en el ambiente subterráneo, que proporcione insumos para el planteo de escenarios que contribuyan a la planificación de los recursos hídricos.

- Específicos:

- Introducir en el tema de la modelación matemática del movimiento del agua subterránea y del transporte de sustancias en el ambiente subterráneo.

- Presentar los elementos básicos para implementar un caso de estudio y evaluar los resultados obtenidos.

- Discutir sobre las ventajas e inconvenientes de la utilización de esta herramienta a través de la interpretación de ejemplos de aplicación.

4. ANTECEDENTES

El curso se planteó en el marco del **Plan INTERCOONECTA** de la Cooperación Española, el cual consiste en un Plan de Transferencia, Intercambio y Gestión de Conocimiento para el Desarrollo de la Cooperación Española en América Latina y el Caribe, cuyo objetivo favorecer y posicionar la transferencia, intercambio y gestión de conocimiento como eje esencial de las políticas públicas de cooperación orientada a resultados de desarrollo sostenibles; y se reestructuran las dinámicas de dirección, planificación, gestión y seguimiento de las acciones que lo integran.

5. AGENDA DEL CURSO.

El Curso se desarrolló a lo largo de 4 días, desde el lunes 02 al jueves 05 de marzo de 2020, a razón de 4 sesiones por día (16 sesiones en total). En la última sesión se realizaron presentaciones de 8 grupos conformados por los países participantes, con el objetivo de que cada grupo de países seleccionara un caso real de estudio en donde se podría aplicar un modelado matemático de acuífero, haciendo énfasis en los datos a requerir y el método de obtención de los mismos, así como los resultados a esperar y beneficios del modelado en sí.

6. PROGRAMA

Lunes, 2 de marzo

- Tema 1: Acto de apertura del curso.
- Tema 2: Objetivos del curso. Presentación de participantes. Expectativas. Modalidad del trabajo.
- Tema 3: La modelación matemática como herramienta en la gestión sostenible del agua. El acuífero como sistema.
- Tema 4: Modelación matemática de acuíferos: planteamiento general, modelo conceptual, matemático y numérico. Condiciones físicas y ecuaciones básicas que rigen el movimiento del agua en un medio poroso saturado. Parámetros y variables necesarios para definir el sistema. Condiciones iniciales y condiciones de borde. Requerimientos de información e incertidumbres.
- Tema 5: Métodos numéricos para la resolución de las ecuaciones de flujo. Herramientas computacionales para implementar la solución numérica de la ecuación de flujo del agua.
- Tema 6: Modelación matemática. Introducción al Modflow. Práctica en Gabinete.

Martes, 3 de marzo

- Tema 7: Recapitulación. Coloquio. Introducción al Modflow.
- Tema 8: Introducción al Modflow. Práctica en gabinete.
- Temas 9 y Tema 10: Práctica en gabinete.

Miércoles, 4 de marzo

- Tema 11: Recapitulación. Coloquio. Planteo de Escenarios.
- Tema 12: Aplicaciones y casos de estudio.
- Tema 13: Métodos numéricos para la resolución de las ecuaciones de flujo. Herramientas computacionales para implementar la solución numérica de la ecuación del transporte de sustancias en el ambiente subterráneo. Ruteo de partículas. Aplicaciones y casos de estudio.
- Tema 14: Práctica en gabinete.

Jueves, 5 de noviembre

- Tema 15: Práctica en gabinete.
- Tema 16: Aplicaciones y casos de estudio.
- Tema 17: Presentaciones a cargo de los participantes.
- CLAUSURA DEL SEMINARIO Y ACTO DE ENTREGA DE CERTIFICADOS DE ASISTENCIA
- Finalización de la jornada – Traslado Centro – Hotel

7. DESARROLLO DE LA AGENDA

Tema 1: Acto de apertura del curso.

El acto de inauguración e intervención de los participantes del curso y del Centro inició a las 9:00 am, la recepción estuvo a cargo del Sr. José Lorenzo García-Baltasar García-Calvo, Director del Centro de Formación de la Cooperación Española en Santa Cruz de la Sierra (AECID), de igual forma la recepción también fue dirigida por la Sra. Betty Janeth Labra Vásquez, Administradora de la AECID, posteriormente se presentaron la Dra. Marta París (Universidad Nacional del Litoral, Santa Fé, Argentina) una de las capacitadoras, y de la misma forma la Lic. Lucia Samaniego (CeReGas) (Figura 1).



Figura 1: Actividad de inauguración.

Tema 2: Objetivos del curso. Presentación de participantes. Expectativas. Modalidad del trabajo. Impartido por la Dra. Marta París.



Figura 2: Tema 2: Presentación de los objetivos, expectativas y modalidad del curso.

Tema 3-a: La modelación matemática como herramienta en la gestión sostenible del agua. Impartido por la Dra. Marta París.

Curso sobre
Modelación Matemática de Acuíferos
Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. 2 al 5 de marzo de 2020

Resultados esperados

- Plantear un modelo hidrogeológico numérico que permita representar el comportamiento del agua en el acuífero y el transporte de sustancias en el ambiente subterráneo.
- Utilizar la herramienta para el planteo de escenarios que contribuyan a la planificación de los recursos hídricos.

La modelación como herramienta de gestión

Figura 3: Planteamiento del modelo hidrogeológico con el fin de utilizarlo como herramienta en la planificación de los recursos hídricos.

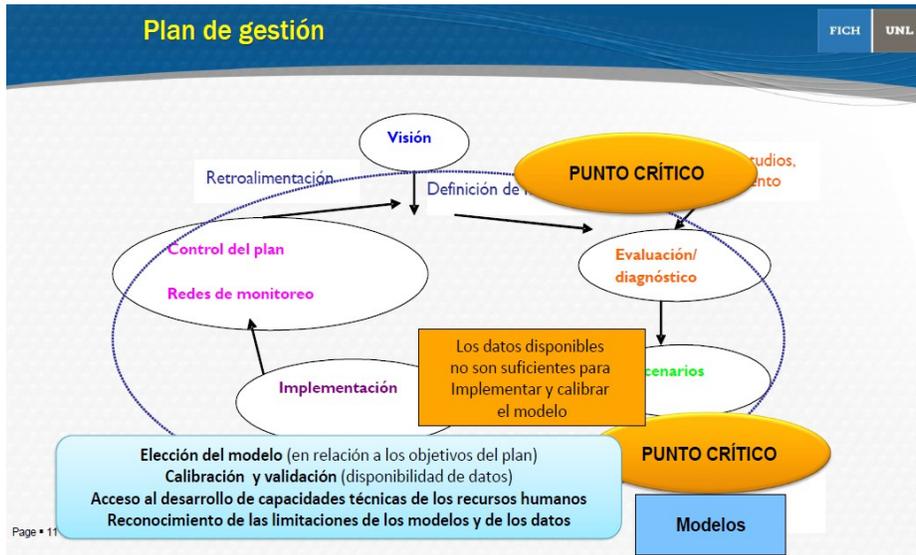


Figura 4: Puntos críticos de un Plan de Gestión, en donde se requiere reevaluar el diagnóstico y los posibles escenarios partiendo de una modelación del sistema, y posteriormente una calibración-validación

Tema 3-b: El acuífero como sistema. Impartido por la Dra. Marta París.

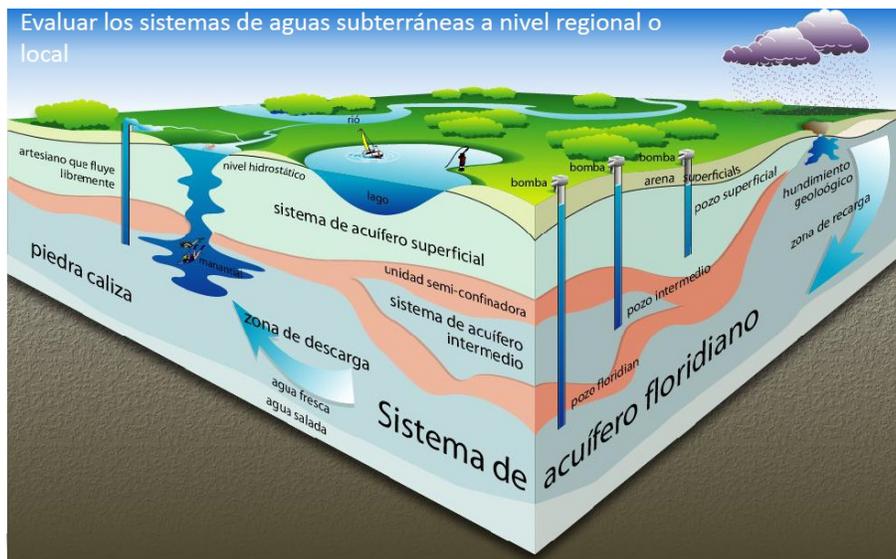


Figura 5: El acuífero es un medio físico conformado por agua y rocas, que ante acciones exteriores como la lluvia (recarga natural), el riego, el bombeo y la evapotranspiración, da lugar a diferentes estadios del sistema que constituyen la respuesta o salida del mismo

Tema 4-a: Modelación matemática de acuíferos: planteamiento general, modelo conceptual, matemático y numérico. Impartido por la Dra. Marta París.

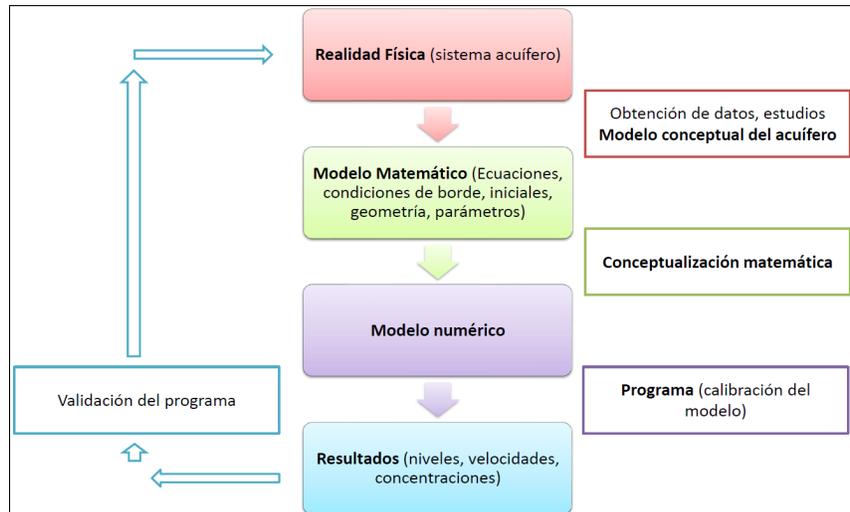


Figura 6: Diagrama con las diferentes etapas de la modelación, desde la toma de datos en campo, hasta la obtención de los resultados, haciendo énfasis en que siempre se puede calibrar y por lo tanto validar aún más el modelo a partir del surgimiento de nueva información.

Tema 4-b: Condiciones físicas y ecuaciones básicas que rigen el movimiento del agua en un medio poroso saturado. Impartido por la Dra. Marta París.

Ecuación diferencial parcial que describe el **movimiento** del agua subterránea en un medio poroso saturado heterogéneo y anisótropo.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_{xx} * \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{yy} * \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(T_{zz} * \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm Q(x, y, z) = S * \frac{\partial h}{\partial t}$$

$Q(x, y, z, t)$ Representa la entrada neta al sistema.

$T_{xx}, T_{yy}, T_{zz}, S$ Son los parámetros.

$h(x, y, z, t)$ Es la variable de estado.

Figura 7: Ecuación Diferencial Parcial, en donde interactúan los parámetros (propiedades intrínsecas) y las variables (estados que varían en espacio y tiempo), tomando en cuenta que se trata de un medio poroso saturado heterogéneo y anisótropo.

Tema 4-c: Parámetros y variables necesarios para definir el sistema. Impartido por la Dra. Marta París.



Figura 8: Afloramiento de agua a través de corte de roca, conociendo el modelo hidrogeológico se obtienen los parámetros necesarios los cuales son valores intrínsecos del medio en el que se mueve el agua.

K (m/día)	Calificación	Calificación del acuífero	Tipo de Materiales
10 ⁻⁶ 10 ⁻⁵ 10 ⁻⁴	Impermeable	Acuícludo	Arcilla compacta Pizarra Granito
10 ⁻³ 10 ⁻²	Poco permeable	Acuitardo	Limo arenoso, Limo, Arcilla limosa
10 ⁻¹ 1	Algo permeable	Acuífero pobre	Arena fina, arena limosa Caliza fracturada
10 10 ²	Permeable	Acuífero de regular a bueno	Arena limpia, grava y arena, arena fina
10 ³ 10 ⁴	Muy permeable	Acuífero excelente	Grava limpia

*Figura 9: Las condiciones de **Conductividad hidráulica** de una roca es una propiedad o parámetro, cuantificable, y es intrínseca varía dependiendo. De la misma forma existen los siguientes parámetros: Porosidad total, Porosidad efectiva, Transmisividad, Coeficiente de almacenamiento y Coeficiente de almacenamiento específico.*

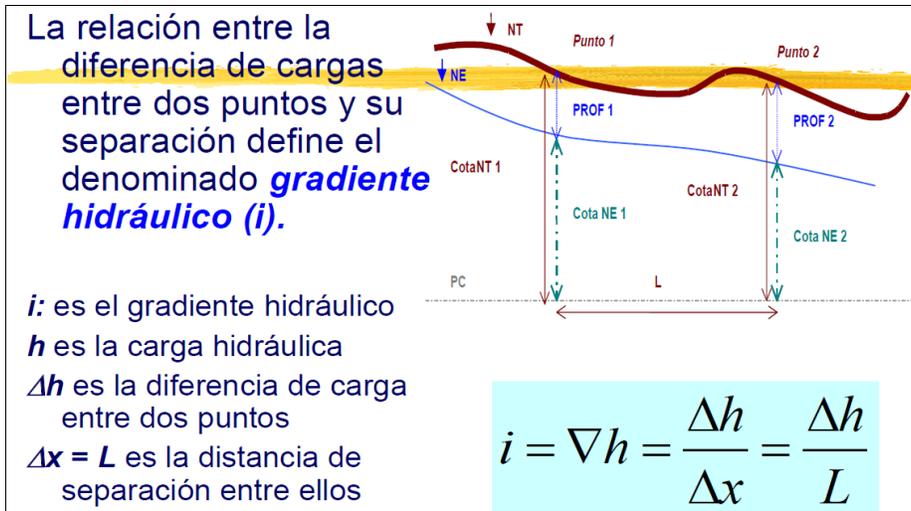


Figura 10: Por otro lado existen las variables, las cuales reflejan el estado en el que se encuentra el sistema o el modelo, y presentan variaciones tanto en el espacio como en el tiempo, una de las variables a analizar es la carga hidráulica, la cual respresenta la elevación a la que se encuentra el nivel del agua subterránea.

Tema 4-d: Condiciones iniciales y condiciones de borde. Impartido por la Dra. Marta París.

Condiciones iniciales

Describen la distribución de los valores de la variable de estado para un tiempo inicial ($t = 0$), en todos los puntos del dominio considerado.

Es la configuración de cargas de la cual partimos para modelar.

Se debe definir que valores tiene $h(x, y, z, 0)$.
 Esto es: en todos los puntos del dominio para $t=0$

Figura 11: Para obtener la solución de la ecuación parcial del flujo, se requieren establecer dos variables, una de ellas serían las **Condiciones iniciales**, las cuales nos condicionarán el tipo análisis que ocupemos, ya sea un análisis puntual en el tiempo, o bien un análisis transitorio

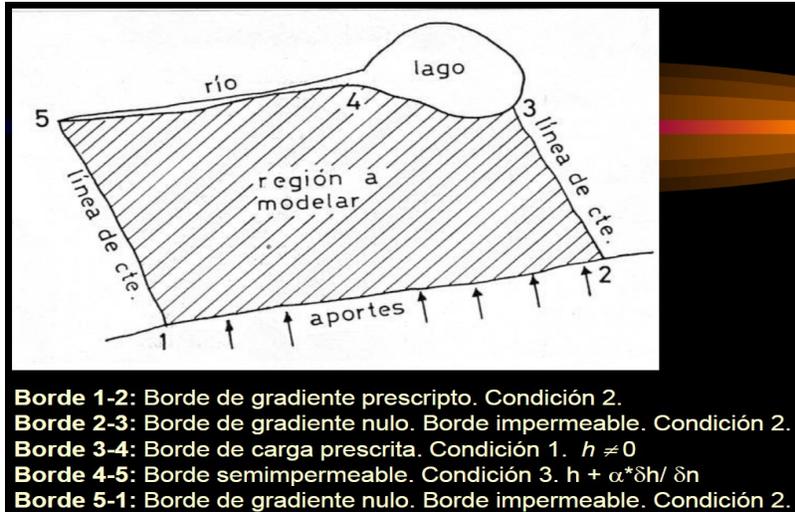


Figura 12: De igual manera que las condiciones iniciales, deben de considerarse las **Condiciones de borde**, las cuales nos definen los límites en los que se encuentra la porción de acuífero que se va a analizar.

Tema 4-e: Requerimientos de información e incertidumbres. Impartido por la Dra. Marta París.

Los dos métodos más difundidos para resolver estas ecuaciones son:

- métodos en diferencias finitas
- métodos en elementos finitos

Figura 13: En relación al punto anterior, se requiere tener un modelo de acuífero bien definido, con información de campo que sustente el modelo planteado. Sin embargo, la solución del modelo matemático planteado debe abordarse mediante la construcción o implementación de un modelo numérico a través de dos métodos.

Tema 5-a: Métodos numéricos para la resolución de las ecuaciones de flujo. Impartido por la Dra. Marcela Pérez.

Diferencias Finitas

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm Q = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Figura 14: Uno de los métodos numéricos para la solución de la ecuación de flujo es el de **Diferencias Finitas** en el cual delimita un sector del acuífero, se subdivide en varios cubos de volumen de agua y se analiza el específicamente el centro de cada uno de los cubos.

Elementos Finitos

- ✓ Aplicable para una mejor definición del dominio a modelar.
- ✓ Más complejo (de programar) que el MDF.
- ✓ Problemas con el balance de masas.

Figura 15: El otro método numérico es el de **Elementos Finitos** en el cual se debe delimitar aún más el acuífero lo que implica restringir aún más el área que se requiere analizar, y puede presentar algunos problemas a la hora de modelar ya que se vuelve más complejo y presenta algunos problemas con el balance de masas

Tema 5-b: Herramientas computacionales para implementar la solución numérica de la ecuación de flujo del agua. Impartido por la Dra. Marcela Pérez.

Diseño de la malla / grilla

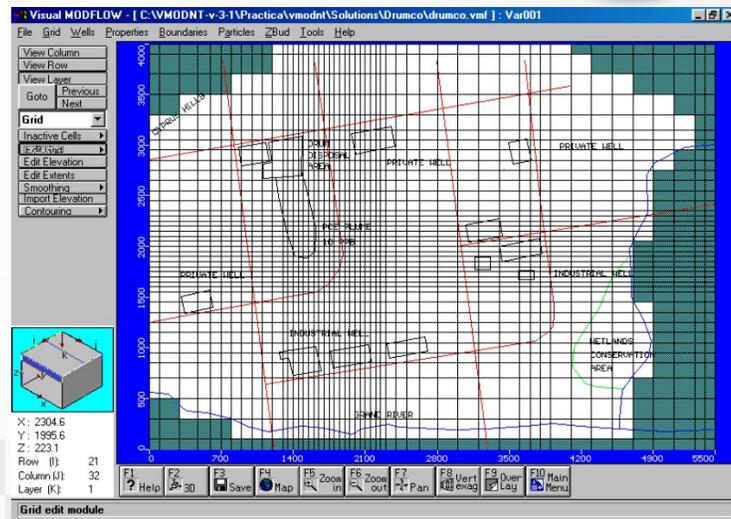


Figura 16: Uno de los software utilizados para obtener la solución a los modelos matemáticos es el Visual MODFLOW, en el cual se delimita una porción del acuífero a modelar mediante el método de diferencias finitas, en la figura se aprecia el diseño de la grilla en vista en planta.

Tema 6: Modelación matemática. Introducción al Modflow. Impartido por la Dra. Marcela Pérez.

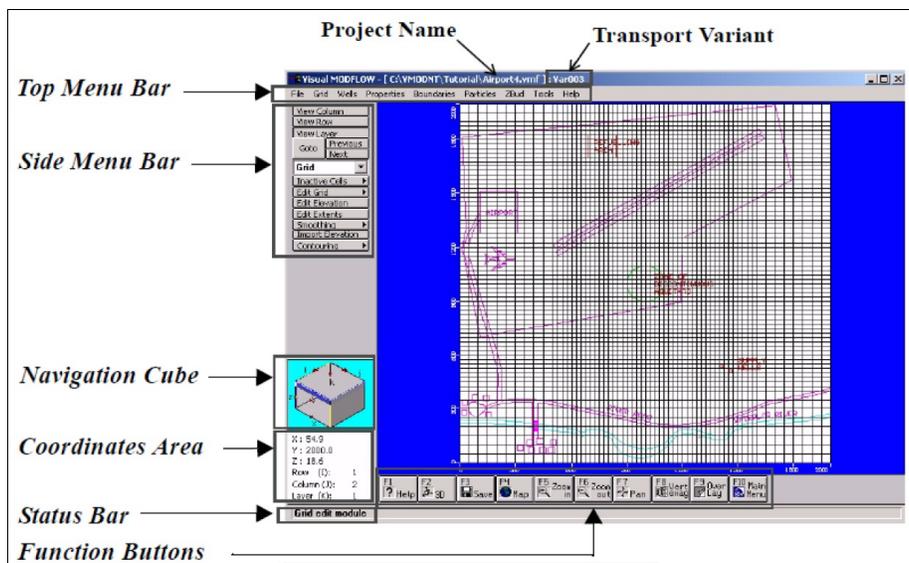


Figura 17: En la capacitación se emplearán las herramientas principales del software, no se detalló por falta de tiempo en configuraciones secundarios como la salida de los mapas o de los perfiles debido a la duración del curso.

Tema 7: Recapitulación. Coloquio. Introducción al Modflow. Impartido por la Dra. Marcela Pérez.

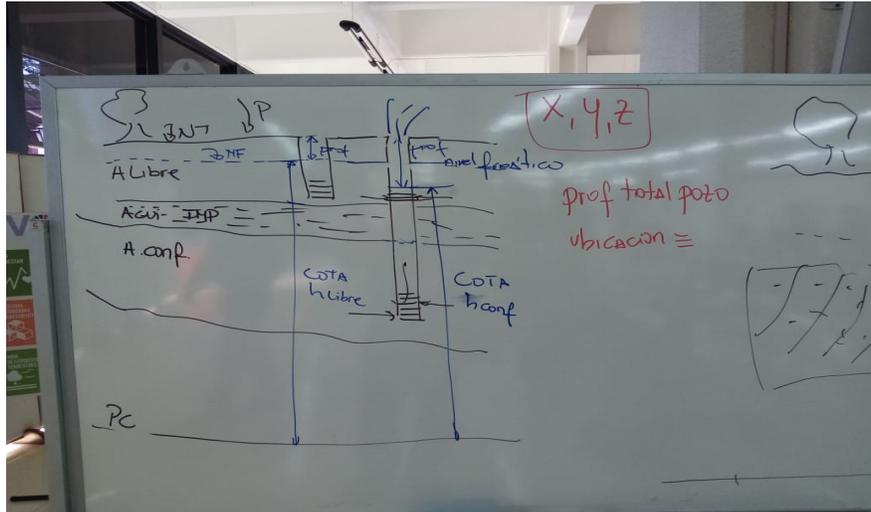


Figura 18: Se realiza un repaso de algunos aspectos hidrogeológicos, repaso de los parámetros y variables requeridas para la implementación del modelo numérico, y los métodos numéricos existentes.

Tema 8-a: Introducción al Modflow. Práctica en gabinete. Impartido por la Dra. Marcela Pérez.

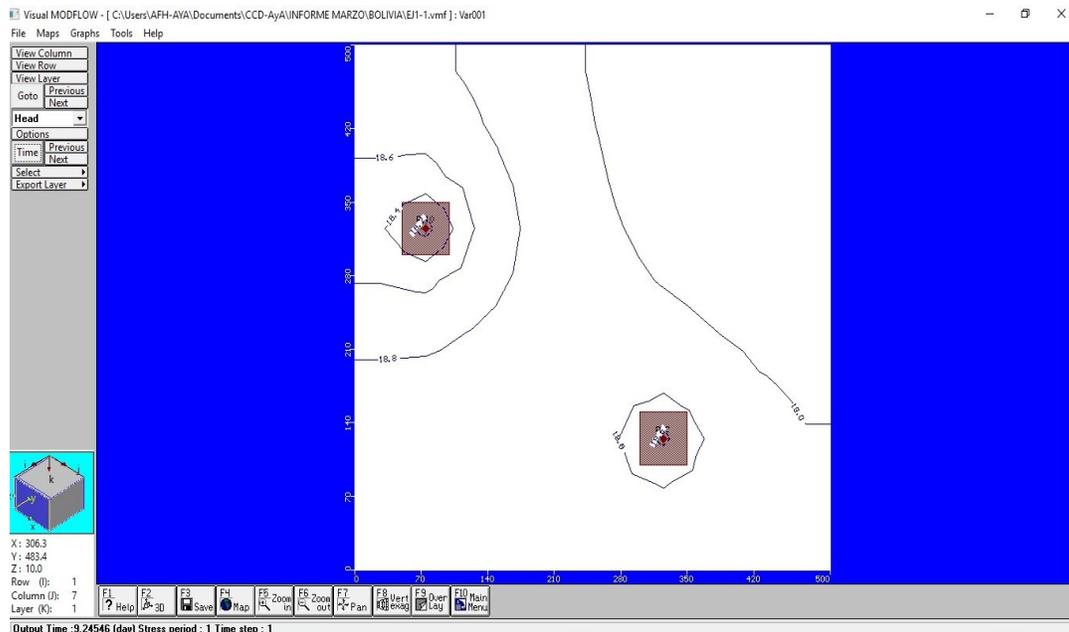


Figura 19: Una de las prácticas se realizó una modelación con dos pozos en bombeo, con diferentes características cada uno, bajo un régimen transitorio en el tiempo, en donde se pueden observar las isofreáticas para un tiempo de bombeo de 9 días.

Tema 8-b: Introducción al Modflow. Práctica en gabinete. Impartido por la Dra. Marcela Pérez.

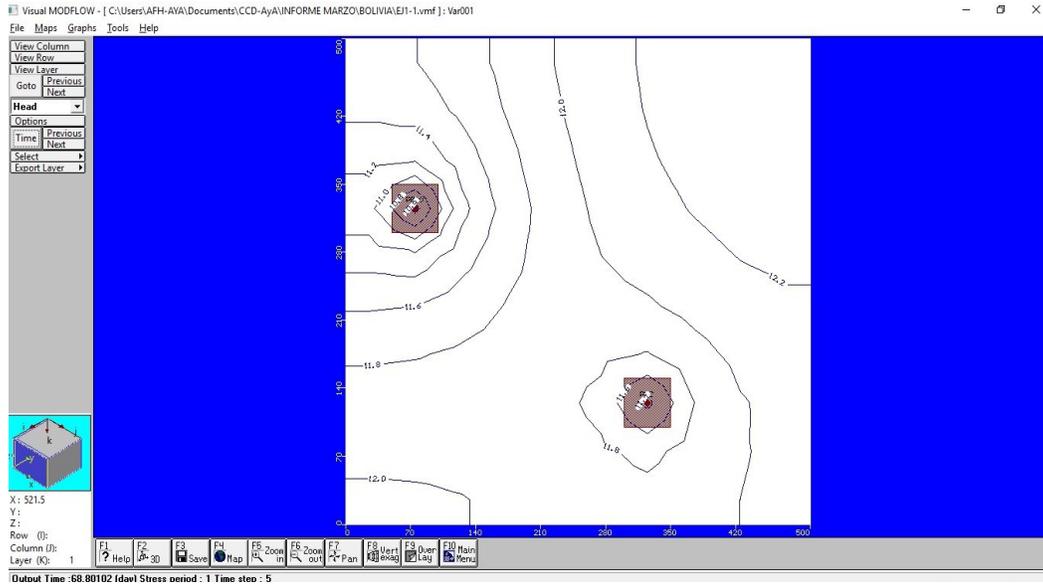


Figura 20: De la misma forma se realizó la modelación bajo un régimen transitorio en el tiempo, en donde se pueden observar las isofreáticas para un tiempo de bombeo de 69 días.

Tema 9: Práctica en gabinete. Impartido por la Dra. Marcela Pérez.

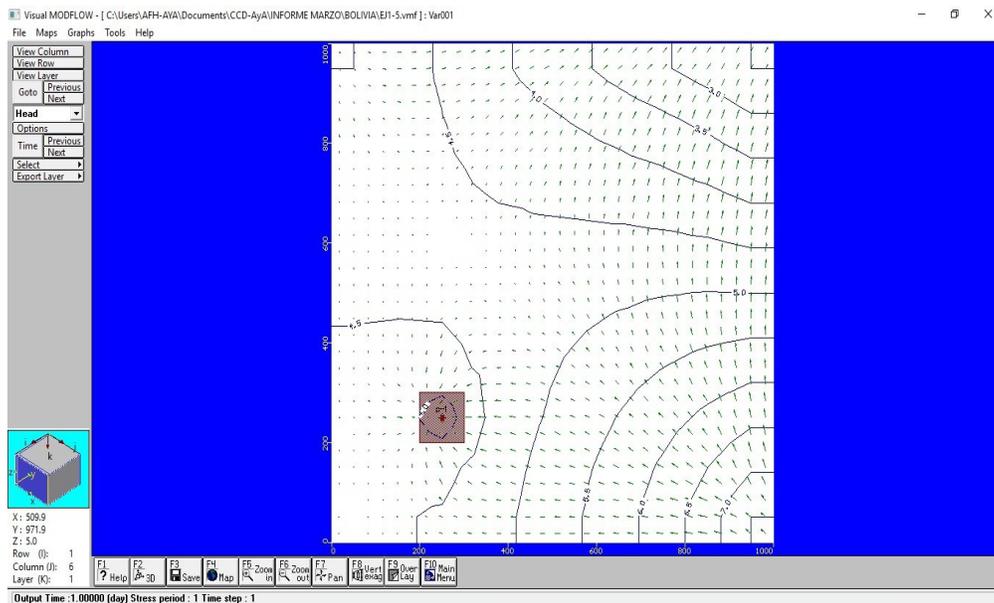


Figura 21: En otra de las prácticas se definieron condiciones de carga constante en los sectores norte y este del área analizada con el fin de observar la dirección de flujo del agua subterránea una vez que el pozo se encuentre bombeando.

Tema 10: Práctica en gabinete. Impartido por la Dra. Marcela Pérez.

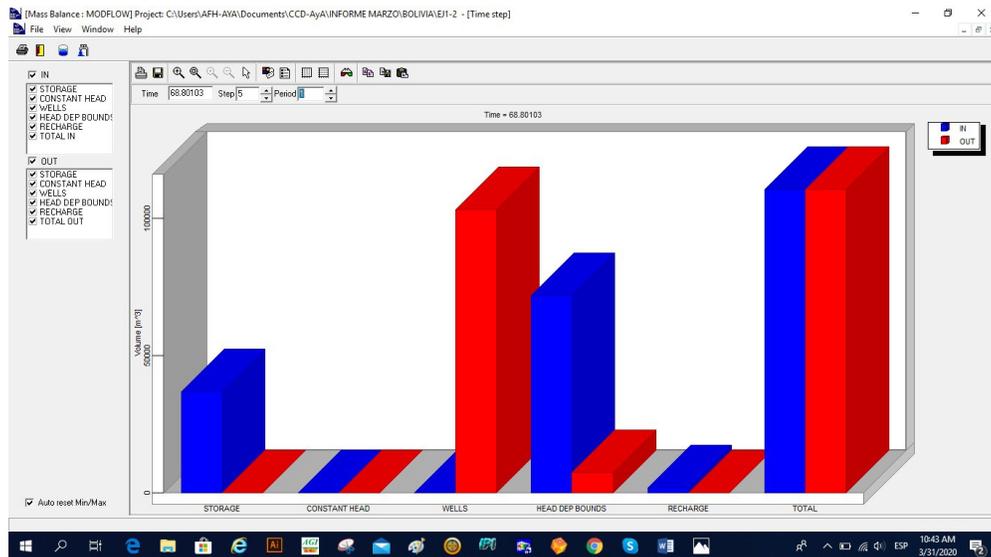


Figura 22: Otra práctica consistió en realizar un modelado y determinar los volúmenes de agua que entran y salen del acuífero, y visualizar las variaciones de estos volúmenes en un tiempo de 365 días.

Tema 11: Recapitulación. Coloquio. Planteo de Escenarios. Impartido por la Dra. Marcela Pérez.



Figura 23: Se realizó una recapitulación de los temas tratados, de casos de cada de aplicación de cada uno de los países participantes y plantear escenarios para así discutir sobre los posibles resultados.

Tema 12: Aplicaciones y casos de estudio. Impartido por la Dra. Marcela Pérez.



Figura 24: Un caso expuesto fue el que realizaron las capacitadoras en la Provincia de Santa Fe en Argentina, en donde determinaron el modelo hidrogeológico presente, y posteriormente modelaron matemáticamente el sistema para conocer la dirección de flujo del agua subterránea y la cantidad de agua que quedaba disponible en el sistema.

Tema 13: Herramientas computacionales para implementar la solución numérica de la ecuación del transporte de sustancias en el ambiente subterráneo. Ruteo de partículas. Impartido por la Dra. Marcela Pérez.

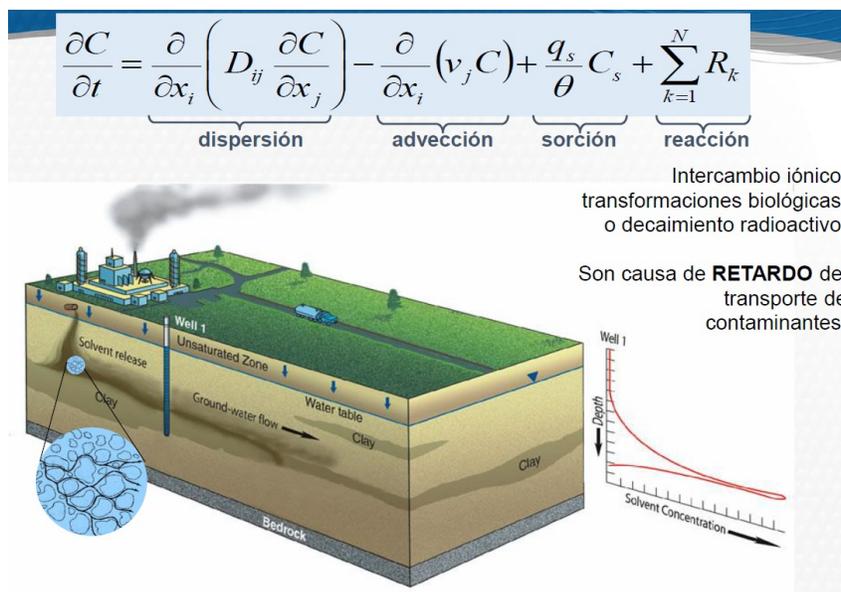


Figura 25: En la capacitación también se explicaron varios modelos de transporte de contaminantes que existen, ya sea por advección, dispersión, adsorción o desorción y reacciones química.

Tema 14: Práctica en gabinete. Impartido por la Dra. Marcela Pérez.

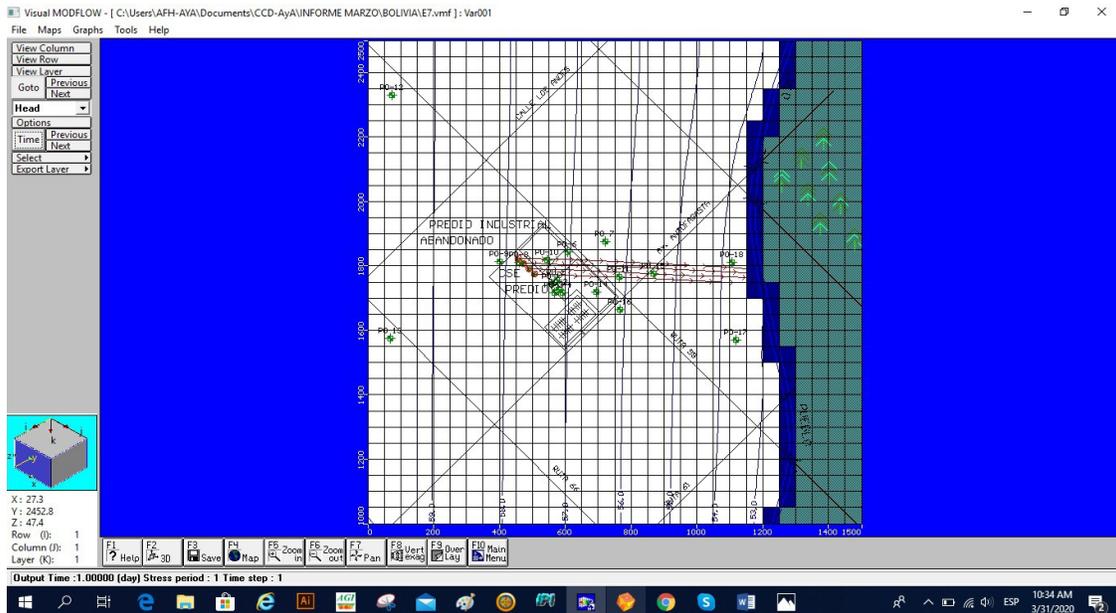


Figura 26: Una práctica de transporte de contaminantes consistió en realizar un modelado y visualizar por medio de la dirección de flujo del agua subterránea, la trayectoria de un contaminante y corroborar si el mismo alcanzará un determinado cuerpo de agua.

Tema 15: Práctica en gabinete. Impartido por la Dra. Marcela Pérez.

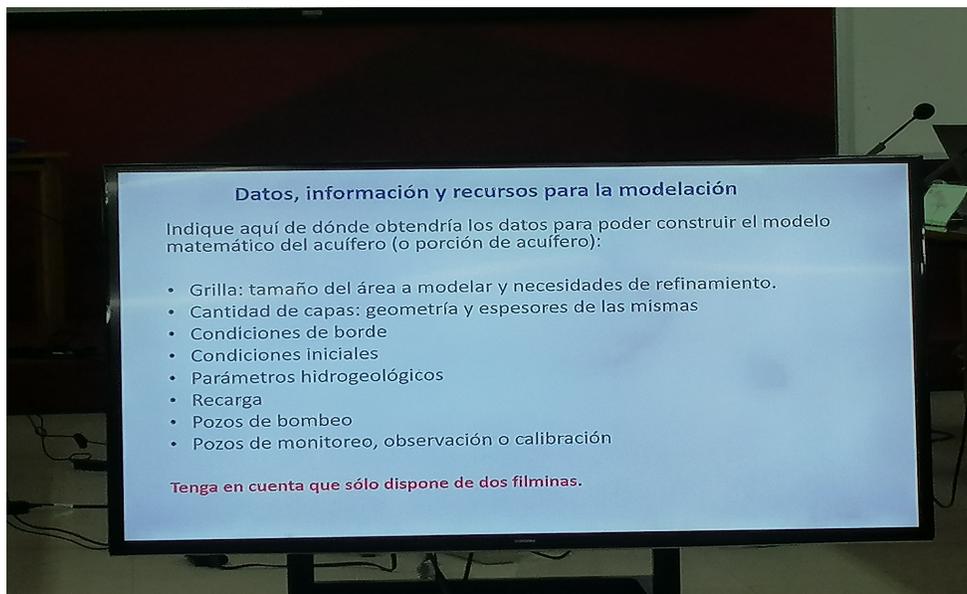


Figura 27: Se determinaron varios grupos de trabajo conformados por los diferentes países, en donde el objetivo fue indicar los pasos a seguir, desde el modelado conceptual-matemático, hasta la modelación numérica y especificar además las metodología a emplear para la obtención de los insumos requeridos

Tema 16: Aplicaciones y casos de estudio. Impartido por la Dra. Marcela Pérez.

ESCENARIO 2: Transporte ADVECTIVO y remediación con bombeo y tratamiento ($Q = 50 \text{ GPM} = 270 \text{ m}^3/\text{d}$)

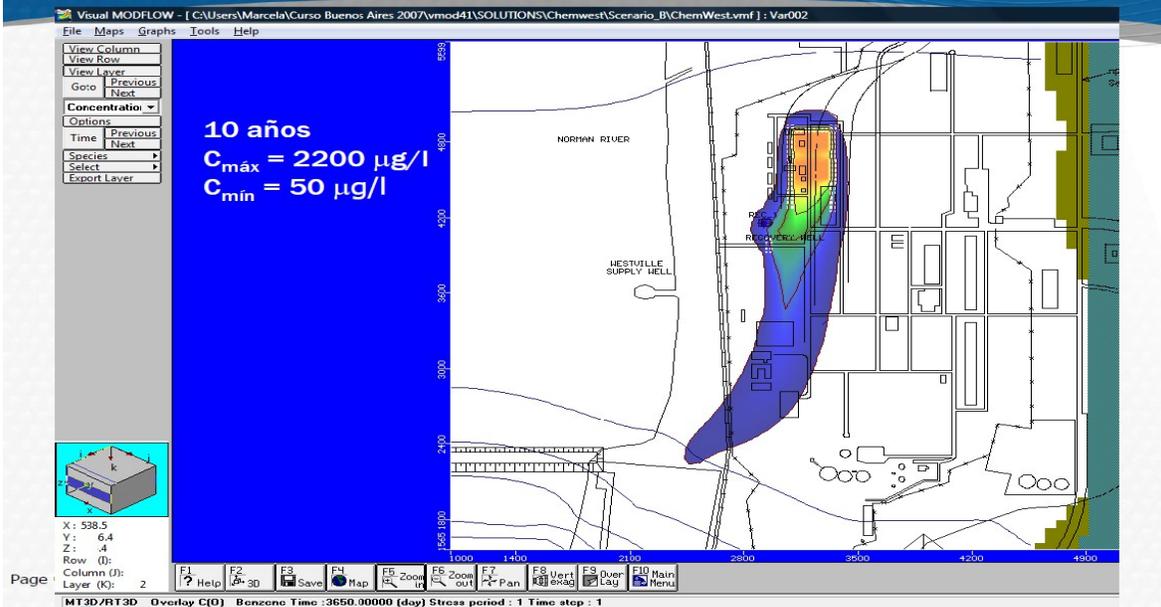


Figura 28: Otro caso de estudio fue en Estados Unidos, en un Fabrica de productos químicos industriales orgánicos e inorgánicos, en donde se realizó una modelación con el Software Visual MODFLOW Pro, para visualizar la trayectoria y la concentración del contaminante en el tiempo con el fin de determinar si existe o no contaminación a pozos cercanos al sitio. Sobre este tipo de modelación no se hizo práctica de gabinete ya que no se contaba con esa versión del software.

Tema 17: Presentaciones a cargo de los participantes. Impartido por Grupo de Trabajo Costa Rica – Colombia.



Figura 29: Uno de los grupos de trabajo fue integrado por los participantes de Costa Rica y Colombia, en donde se debía indicar que insumos se requerían evaluar la potencialidad en sí del Acuífero superficial de Villavicencio Meta Colombia, además de especificar la configuración de los datos de entrada del modelo y determinar además que otros resultados podrían obtenerse a partir de dicho modelado

8. Conclusiones /acuerdos/Recomendaciones

- Se correlacionó un modelo hidrogeológico conceptual con una modelación matemática, y conocer a detalle los elementos básicos que se implementarán en dicho análisis.
- Aplicar las leyes físicas que rigen el mecanismo de flujo de agua subterránea, así como los diferentes parámetros hidráulicos y variables de acuíferos que deben implementarse en una modelación matemática-numérica.
- Se realizaron con el software varios casos de modelación matemática con el fin de visualizar tanto el movimiento del agua subterránea como la trayectoria de algún contaminante cercano a algún punto de interés en específico.
- Se realizaron discusiones grupales tomando en cuenta dos casos, en donde se puede realizar una modelación con variaciones en la recarga para un mismo acuífero y como es posible obtener resultados distintos de volúmenes de almacenamiento dentro del mismo. O bien realizar variaciones en los parámetros intrínsecos de dos acuíferos y observar que en ambos es posible obtener volúmenes de agua similares, esto debido a una interrelación existente entre parámetros de transmisividad y permeabilidad.

- La utilización de este software aportará al Área Funcional Hidrogeología de la UEN Gestión Ambiental un conocimiento aún más detallado de la interacción que puede darse tanto entre de dos o más acuíferos, como entre un acuífero y demás cuerpos de agua superficial cercanos a este. Lo cual proporcionará una herramienta muy potente que ayudará a evitar problemas de sobreexplotación de acuíferos, como también ayudará a prevenir problemas de transporte de contaminantes de ciertas infraestructuras cercanas a acuíferos que se estén aprovechando, y con esto, garantizar la calidad y cantidad de agua necesaria para el debido suministro poblacional, lo cual ha venido representando recientemente un problema a la gestión efectiva del recurso hídrico del país. Por lo que es de suma importancia dar a conocer a la Subgerencia Ambiental, Investigación y Desarrollo, que se pueda contar más adelante con este paquete de software para así fortalecer aún más la realización de los estudios hidrogeológicos que tiene a cargo esta Área Funcional.

9. Observaciones

- Se cuenta con material de apoyo en formato digital el cual será entregado a los profesionales del Área Funcional Hidrogeología de la UEN Gestión Ambiental para conocimiento y aplicación de los compañeros geólogos e hidrogeólogos:
 - Presentaciones de las expositoras de la capacitación, así como las presentaciones de los grupos conformados por los países participantes.
 - Manuales varios en pdf como guías para el uso del software MODFLOW, así como manuales para los paquetes: MODPATH, MT3D Manual y Visual MODFLOW Pro, cabe indicar que estos 3 últimos paquetes no fueron del contenido del curso, ya que el programa del curso solo se enfocaba en el empleo del MODFLOW.

Profesional responsable
Geól. Christian Corrales Díaz
AREA FUNCIONAL HIDROGEOLOGÍA – UEN GESTIÓN AMBIENTAL
INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS