

# **CURSO DE MÉTODOS NUMÉRICOS APLICADOS A LA INGENIERÍA DEL TERRENO**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA**

## **INTRODUCCIÓN A LA MODELIZACIÓN DE REDES DE FLUJO MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA SEEP/W 2007. V2011**



**Germán López Pineda**

**Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos**

**Universidad de Córdoba**

**Departamento de Mecánica**

## ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN .....	4
1.1	Características del programa.....	5
1.1.1	Tipos de análisis: .....	5
1.1.2	Geometría y estratigrafía:.....	5
1.1.3	Propiedades de los suelos: .....	5
1.1.4	Condiciones de contorno del problema: .....	5
1.2	Iniciando el programa .....	6
1.3	Especificar la identificación del proyecto.....	9
1.4	Opción Settigs .....	11
1.5	Opción control .....	11
1.6	Opcion Convergence .....	11
1.7	Opción Time .....	12
2	PROBLEMA DE EJEMPLO.....	15
2.1	Definición del problema .....	16
2.2	Definición del area de trabajo .....	17
2.3	Definición de la escala y unidades de cálculo .....	18
2.4	Definir el espaciado de malla.....	19
2.5	Ejes del boceto .....	20
2.6	Guardar el archivo del problema.....	22
2.7	Realizar un zoom sobre el trabajo. ....	24
2.8	Definir las propiedades de los suelos .....	25
2.9	Funciones de conductividad hidráulica. ....	29
2.10	Introducir los puntos de los contornos .....	32
2.11	Visualización de contornos. ....	35
2.12	Condiciones de Contorno .....	37
2.13	Regiones .....	38
2.14	Asignación de materiales.....	42
2.15	Generación y modificación de la malla del modelo de elementos finitos. ...	49
2.16	Tipificación de la condiciones de contorno.....	53

2.17	Valoración de las condiciones de contorno.....	55
2.18	Aplicación de las condiciones de contorno. ....	56
2.19	Colocación de secciones de control de flujo. ....	61
2.20	Verificar la existencia de errores.....	63
2.21	Resolver el problema.....	64
2.22	Ver resultados del cálculo.....	66
2.23	Cálculo del caudal infiltrado.....	67
2.24	Dibujo de contornos.....	69
2.25	Modificación de los contornos.....	69
2.26	Etiquetas en los contornos .....	71
2.27	Representación de Presiones de poro y presiones de altura piezométrica	72

# INICIO

## 1 Introducción

---

Dentro del Curso de Métodos Numéricos Aplicados a la Ingeniería del Terreno se hace una introducción al uso del programa SEEP/W, para la modelización de redes de flujo a través del Método de Elementos Finitos.

La elección del programa SEEP/W se debe fundamentalmente a :

- Es un programa muy difundido en las consultoras de Ingeniería del Terreno.
- Posee una licencia para uso de estudiantes sin coste, con algunas limitaciones de uso, pero suficiente para su aprendizaje inicial.
- Es fácil de aprender y muy intuitivo, con herramientas tipo CAD.

Dentro de los programas del paquete **Geoestudio** de la empresa **Geoslope**, nos introduciremos en el uso del programa **SEEP/W**, para la modelización y estudio de las redes de flujo en medios permeables .

Esperando que este texto de introducción al programa **Seep/W 2007** sea útil a los participantes del curso, como introducción al uso de dicho programa.

En la página web de la empresa propietaria del paquete : <http://www.geoslope.com>, es posible bajarse la versión para estudiantes comentada anteriormente con algunas limitaciones de uso, éste manual se adecua a dicha versión limitada pero suficiente para introducirse en el uso del programa.

Se intenta con este manual de introducción, que el alumno una vez termine de poner en práctica los pasos descritos esté capacitado para al menos en un estado inicial poder enfrentarse a problemas de redes de flujo en las modalidades que normalmente aparecen en actividad del ingeniero, pantallas, presas de materiales sueltos etc.

Este texto está basado en el tutorial de la versión 5.11, que se usó adaptándolo a la versión 2007.

Se entiende que el lector tiene conocimientos básicos de mecánica de suelos en lo concerniente a filtración, redes de flujo y que domina los conceptos de presión total, efectiva e intersticial, permeabilidad, sifonamiento, etc

Además se le suponen al lector unos conocimientos matemáticos mínimos del método de los Elementos Finitos, usado en este programa.

El ejemplo usado lo es a título meramente académico.

Como es la primera versión no es extraño encontrar erratas, omisiones etc por lo que se ruega al lector lo comunique para solucionar este tipo de incidencias en próximas ediciones.

Cualquier sugerencia, que el usuario o lector de este manual quiera comentar, puede ser remitida a la dirección de correo electrónico [me1lopig@uco.es](mailto:me1lopig@uco.es) o bien a [german.lopez@uco.es](mailto:german.lopez@uco.es).

## 1.1 Características del programa

El programa a cuyo uso nos vamos a introducir tiene fundamentalmente en su versión 2007 las siguientes características definidas a continuación:

### 1.1.1 Tipos de análisis:

El programa permite realizar los cálculo de redes de flujo a través de dos tipos fundamentales de análisis :

- Régimen estacionario, el tiempo no interviene como variable en el proceso.
- Régimen transitorio, se tiene en cuenta la evolución del sistema con el tiempo.

### 1.1.2 Geometría y estratigrafía:

La introducción de los condicionantes geométricos son muy versátiles y se adaptan prácticamente a cualquier geometría:

- Geometría adaptable a cualquier contorno estratigráfico mediante herramientas gráficas a través de la definición de regiones

### 1.1.3 Propiedades de los suelos:

Con objeto de modelizar el comportamiento de los suelos el programa dispone de varios modelos de comportamiento.

- Permeabilidad del terreno.
- Relación entre permeabilidades  $K_y/K_x$
- Variación direccional de la permeabilidad de la componente  $k_x$ .
- Modelo de estado saturados o insaturado/saturado
- Definición de función de conductividad en suelos insaturados.

### 1.1.4 Condiciones de contorno del problema:

Para el estudio del comportamiento del modelo además de la parametrización del terreno es necesario definir las propiedades de los contornos del modelo, para ello disponemos de la siguientes opciones:

- **Head** (Altura piezométrica=Altura de cota+altura de presión)

- **Total Flux** (Caudal Filtrado)
- **Press Head** (Altura de presión)
- **Unit Flux** (Flujo unitario)
- **Unit Gradient** (Gradiente unitario)

En este manual sólo usaremos las tres primeras, que serán explicadas en el apartado de definición de las condiciones de contorno.

## 1.2 Iniciando el programa

El paquete de programas Geostudio está compuesto de varias herramientas con distintos usos y funcionalidades:

- **Slope/W** para cálculo de estabilidad de taludes
- **Seep/W** para cálculo de redes de flujo y filtración.
- **Sigma/W** orientado al cálculo de tensiones y deformaciones de suelos o rocas sometidos a carga.
- **Quake/W** para cálculo de los efectos de sismos en suelos y estructuras de suelos (presas, terraplenes, etc)
- **Temp/W** aplicación de la ecuación del calor sobre estructuras de suelos.
- **Ctran/W** aplicado a fenómenos de difusión de contaminantes en suelos
- **Vadose** usado en la modelización de acuíferos.

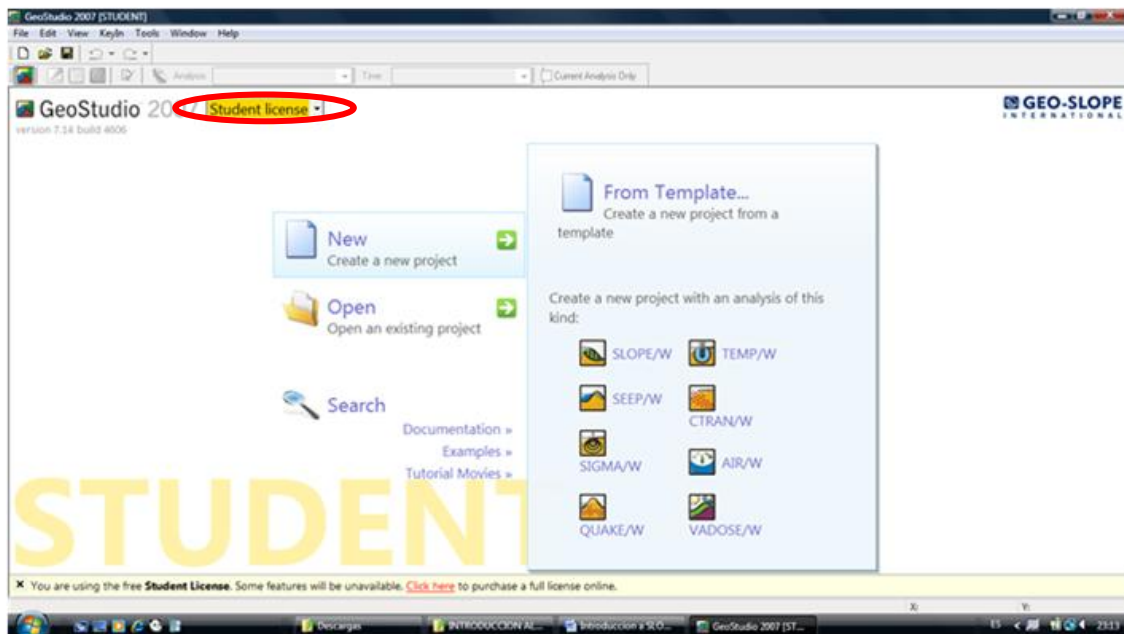
Todos estos programas están interrelacionados por lo que una geometría planteada para un tipo de problema, por ejemplo cálculo de asentos en un terraplén puede servir para un cálculo de estabilidad sin más que dar los correspondientes parámetros resistentes de los materiales, no necesitando introducir los puntos que definen la geometría, ya que estos se importan directamente.

En este texto sólo nos vamos a adentrarnos en los primeros pasos para poder aplicar con cierta soltura el programa Seep/W dentro del paquete Geostudio 2007, y poder comenzar a introducirnos en la aplicación de la potencia de este programa orientado al estudio del comportamiento de redes de flujo posee.

Para proceder a arrancar el programa podemos hacerlo desde el escritorio o desde el menú de inicio tal como vemos en la siguiente figura:



Una vez que pulsamos el icono de arranque del programa ya sea desde el escritorio o desde el menú de inicio nos aparecerá la pantalla que vemos debajo de este texto.



En la parte derecha vemos varios iconos cada uno correspondiente a un programa distinto del paquete Geostudio, en la zona del centro inferior aparecen unos enlaces a

manuales, ejemplos y videos desde la red de cada uno de los programas que componen el paquete.

En la parte central aparece un listado desde donde podemos acceder a nuestros últimos trabajos .

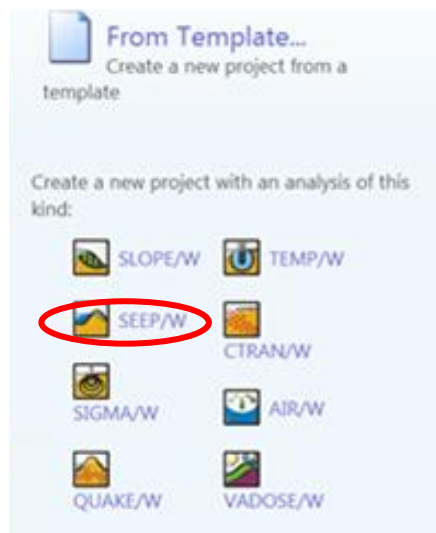
En la lista desplegable **licensing**, marcada en rojo en la figura siguiente, tenemos varias opciones:

- **Full License** si tenemos la licencia completa del programa, podemos usar todas sus características sin limitaciones.
- **Basic License** si tenemos licencia de uso restringido a algunas aplicaciones, podemos realizar cálculos con ciertas limitaciones en cuanto a los modelos que podemos generar.
- **Student License**, que es la licencia que vamos a usar en este manual, y que activaremos por defecto se pueden usar funcionalidades de todos los programas limitados a ciertos aspectos concernientes a la generación de modelos, métodos de cálculo etc.
- **Viewer License**, usada para visualizar cualquier archivo generado, pero sin poder calcular ni guardar cambios.

Activamos por lo tanto la opción **Student license**, tal como puede apreciarse en la figura siguiente.

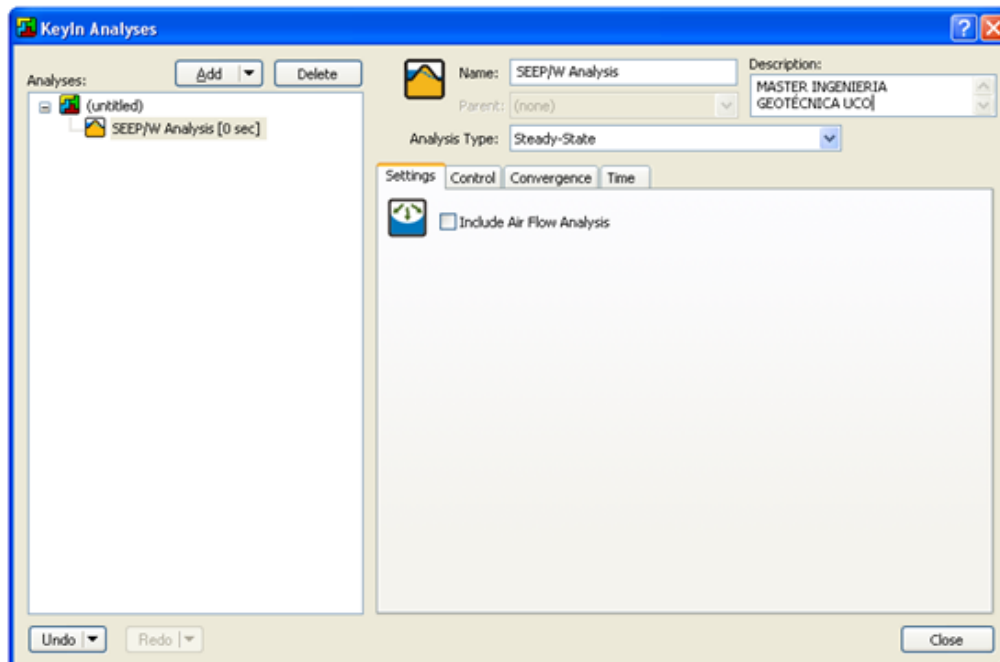


Dentro de esta misma columna más arriba encontramos los iconos de los programas del paquete, en nuestro caso pulsaremos en el icono **Create a SEEP/W analysis**, tal como aparece en la figura siguiente.



Una vez pulsado en icono que aparece dentro del recuadro en rojo aparece la pantalla principal del programa, con la que vamos a seguir varios pasos para identificar el proyecto y configurar los parámetros asociados al modelo que vamos a crear.

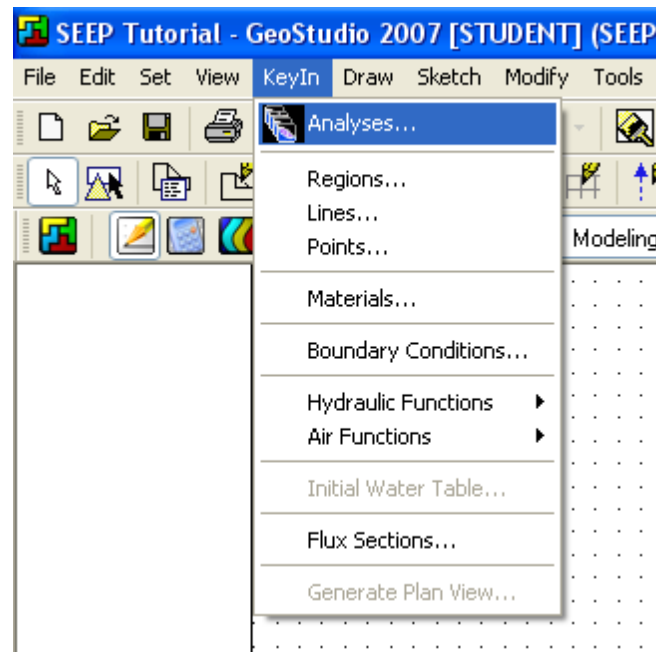
Esta es la pantalla inicial con la que vamos a proceder a la identificación de nuestro problema.



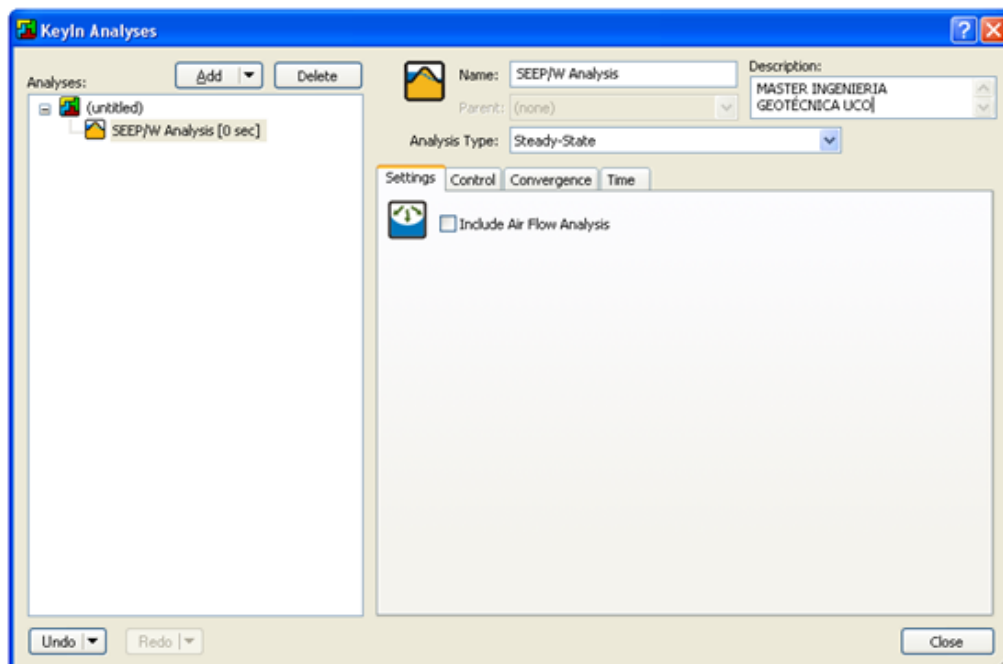
### 1.3 Especificar la identificación del proyecto

- Además de esta opción existe otra con la que podemos acceder a la pantalla anterior

- Seleccionar **Analyses...** en el menú desplegable **KeyIn**. Tal como se ve en la figura.



- Aparecerá la misma pantalla que en el punto anterior



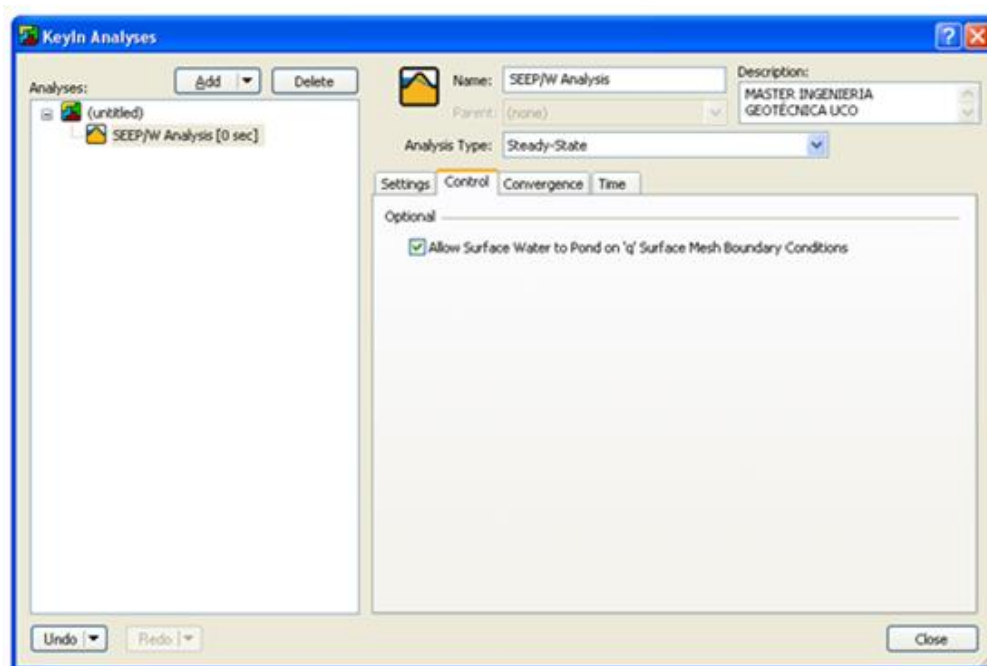
- Rellenamos los casilleros **Name** indicamos en nombre del proyecto que no tiene porque coincidir con el del archivo que estamos usando.
- En el casillero **Description** colocamos una breve descripción del proyecto.
- En la lista desplegable **Analysis Type** elegimos la opción **Steady-State**.

#### 1.4 Opción Settigs

- Activando pestaña **Settigs** desactivamos la opción *Include air flow analysys* , en nuestro modelo no vamos a tener en cuenta el comportamiento del aire como fluido en sistemas semisaturados.

#### 1.5 Opción control

Seleccionamos la pestaña Control .

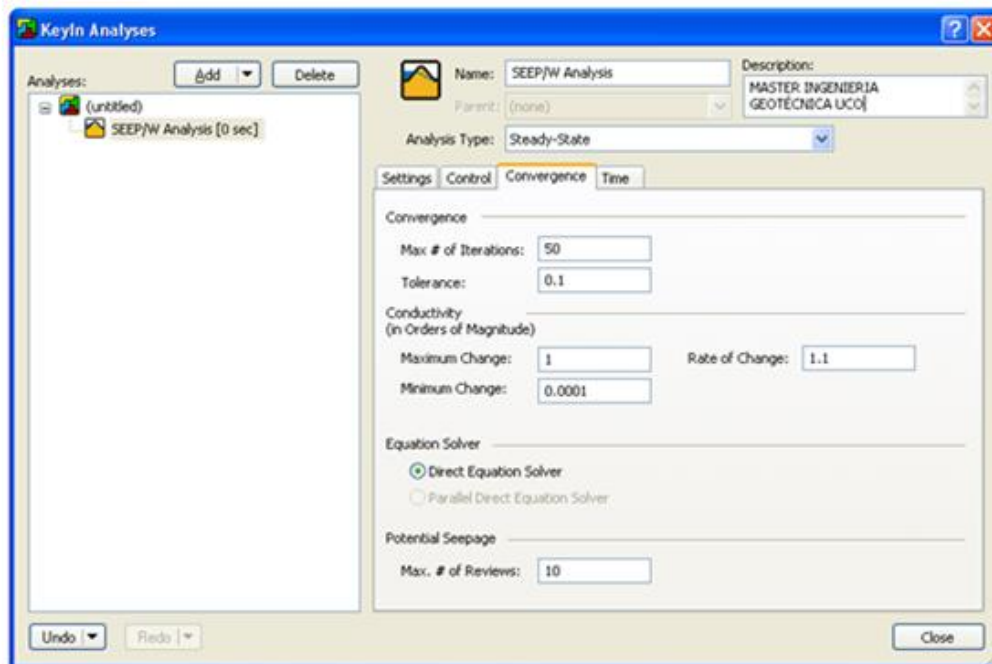


- Marcamos el casillero Allow Surface water to pound 'q'surface mesh Boundary conditions.

Pasamos a la siguiente opción

#### 1.6 Opcion Convergence

Pulsamos en la pestaña **Convergence**, con esta opción vamos a ajustar los parámetros de cálculo de nuestro modelo.

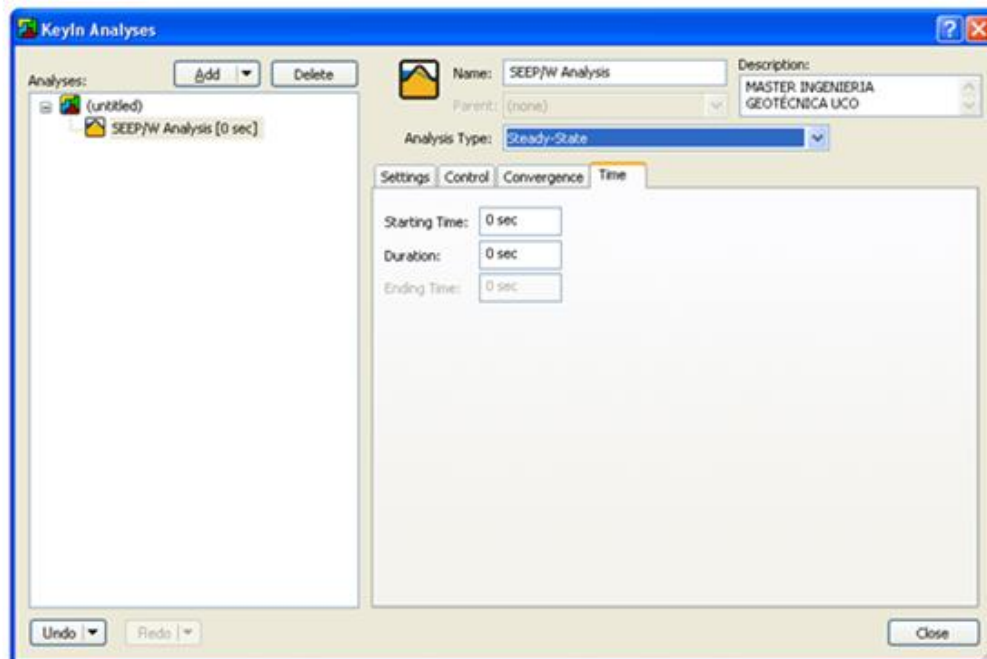


- Colocamos el valor 30 en la casilla **Max # of iterations** (máximo número de iteraciones)
- El valor 0,01 en el casillero **Tolerance** (tolerancia)
- Valor 1 en el casillero **Maximum Change** y 0,0001 en el casillero **Minimum Change**
- En el casillero **Rate of change** escribimos en valor 1,1
- Activamos el casillero **Direct Equation Solve**.
- En el casillero **Max # of Reviews** colocamos el valor 10
- Continuamos con la siguiente opción **Time**.

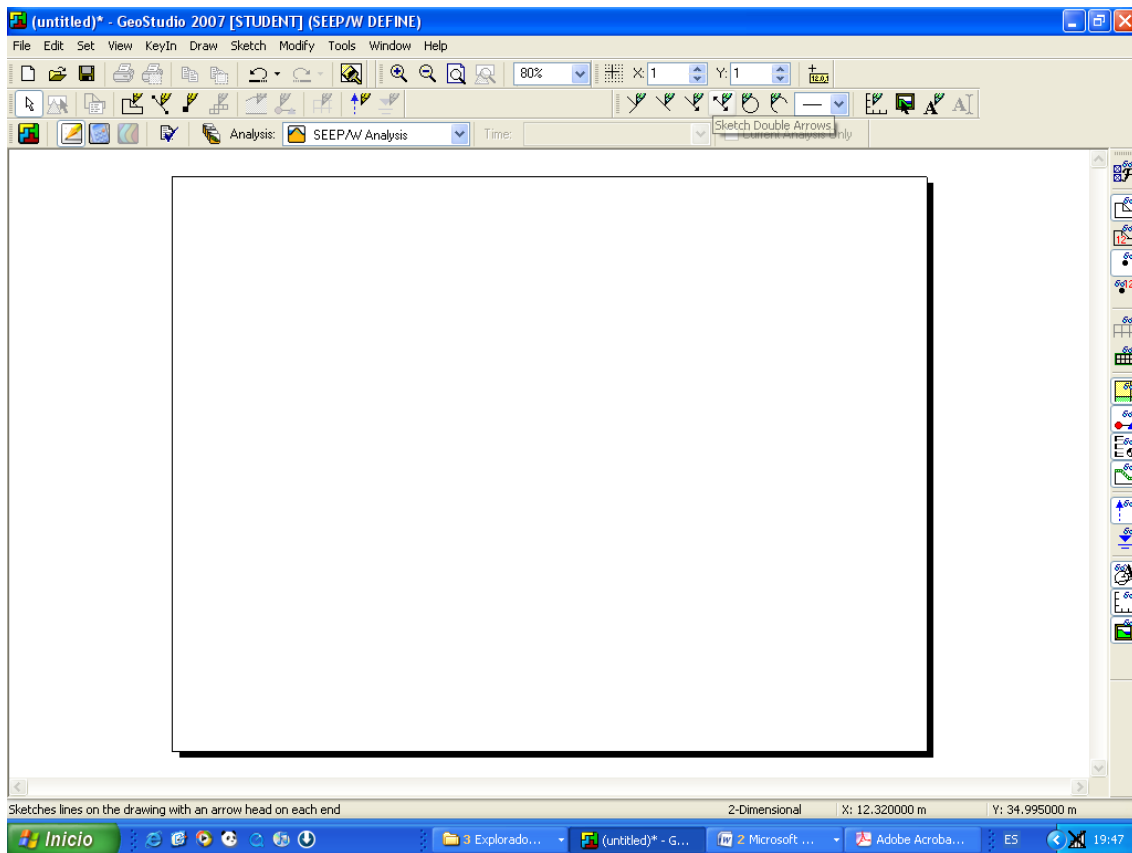
## 1.7 Opción Time

Seleccionamos la pestaña Time.

- Dejamos a 0 los casilleros modificables, tal como se ve en la pantalla anterior.



Después de esto damos por concluida la modificación de parámetros y pulsamos **close**, nos aparecerá la siguiente pantalla:

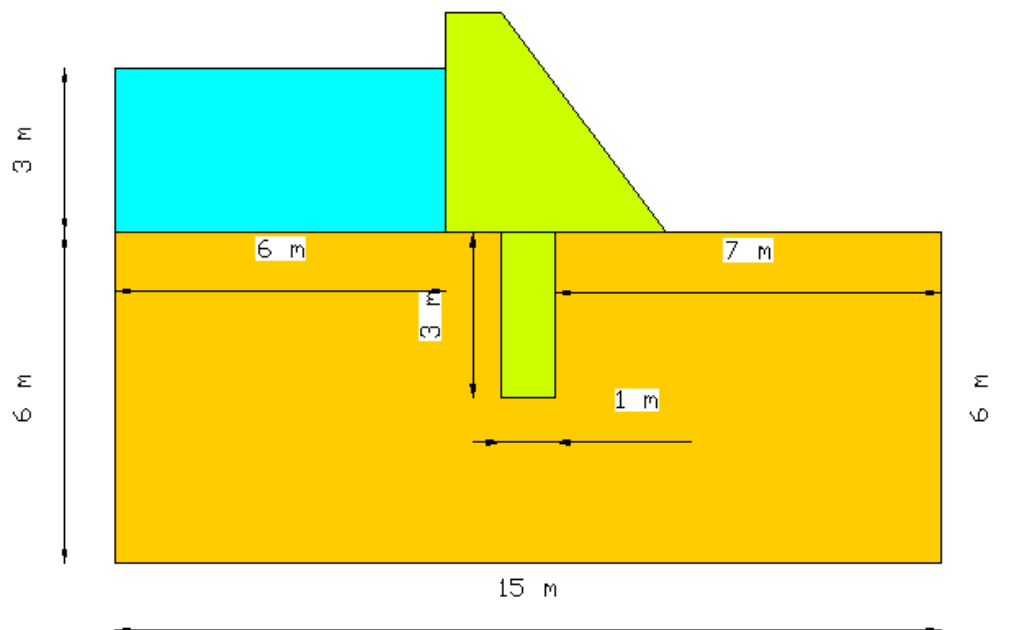


A partir de aquí podemos empezar a introducir geometrías, mallas parámetros y todos los datos necesarios para modelizar el comportamiento de una red de flujo en un terraplén, presa, excavación etc.

## 2 Problema de ejemplo

Comenzamos con un sencillo problema en el que se va a calcular la red de flujo de un sistema formado por una presa de pequeña altura con una pantalla impermeable.

Las características geométricas del problema corresponden al siguiente croquis:



Es evidente que antes de afrontar cualquier problema es necesario tener acotado geoméricamente los contornos exteriores contactos entre distintos materiales, puntos de borde, condiciones de contorno, etc.

La característica fundamental que caracteriza el comportamiento hidráulico del terreno es la permeabilidad que para nuestro terreno tiene un valor de  $k_y=k_x=10^{-5} \text{ m/s}$ , la geometría del problema y las condiciones de borde o contorno van a definir la red de flujo resultante.

## 2.1 Definición del problema

Para la definición completa del problema necesitamos los siguientes datos:

- Geometría de contorno del problema
- Límites entre capas de terreno, si existieran varios terrenos.
- Valores de la permeabilidad de los distintos terrenos.
- Variación de la permeabilidad según la dirección.
- Definiciones de las funciones de permeabilidad en condiciones saturadas/no saturadas.
- Condiciones de contorno, altura piezométrica, caudal filtrado, zonas impermeables etc.

En los puntos que se desarrollan a continuación vamos a aprender a modelizar un problema con un solo suelo.

Los puntos que definen el contorno exterior que definen el problema son:

<b>TABLA 1. Puntos del contorno.</b>		
1	0.00	6.00
2	6.00	6.00
3	7.00	6.00
4	7.00	3.00
5	8.00	3.00
6	8.00	6.00
7	10.00	6.00
8	15.00	6.00
9	15.00	0.00
10	0.00	0.00
11	6.00	10.00
12	7.00	10.00

13	0.00	9.00
14	6.00	9.00

De estos puntos los correspondientes desde el 1 al 10 corresponden al contorno del material sobre el que vamos a estudiar la red de flujo que va a formarse, los restantes puntos corresponden al contorno de la presa y recreación del nivel del agua sobre esta.

Es conveniente tener a mano un boceto realizado a mano alzada o con programas de cad donde esté bien definido el problema para así poder definir bien los contornos y contactos de los materiales, por lo tanto se considera casi un paso previo recomendable, por lo menos el tener un boceto con los puntos acotados y numerados.

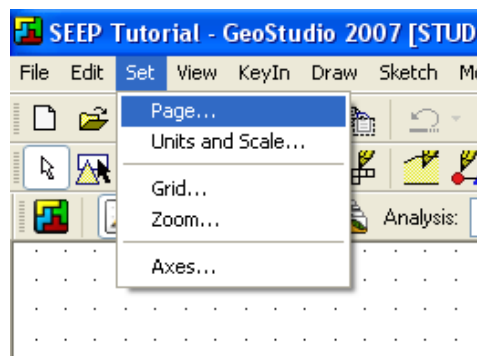
## 2.2 Definición del área de trabajo

El área de trabajo, es el área establecida por el usuario para definir el problema. El área puede ser más pequeña, igual o más grande que el tamaño del papel.

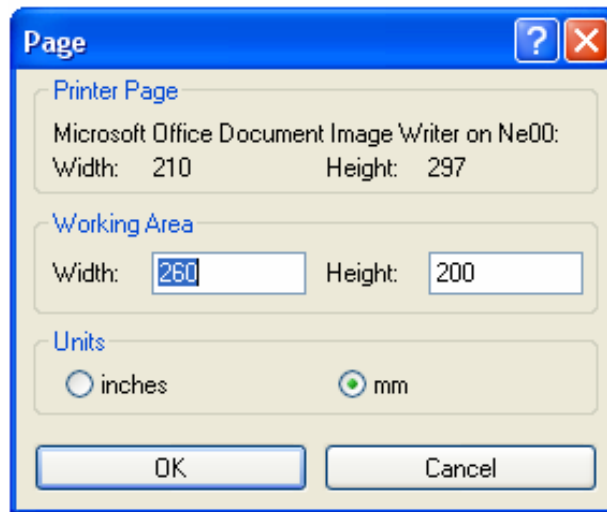
Para el ejemplo, vamos a definir un área de trabajo de 260 mm de ancho x 220 mm de alto.

Para definir el tamaño del área de trabajo:

- Seleccionamos **Page** en el desplegable **Set** tal como se ve en la siguiente figura



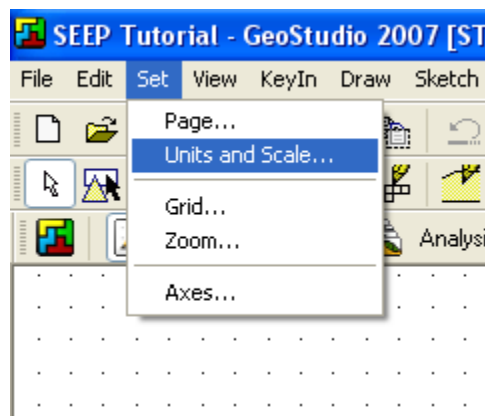
y aparecerá el cuadro de diálogo siguiente:



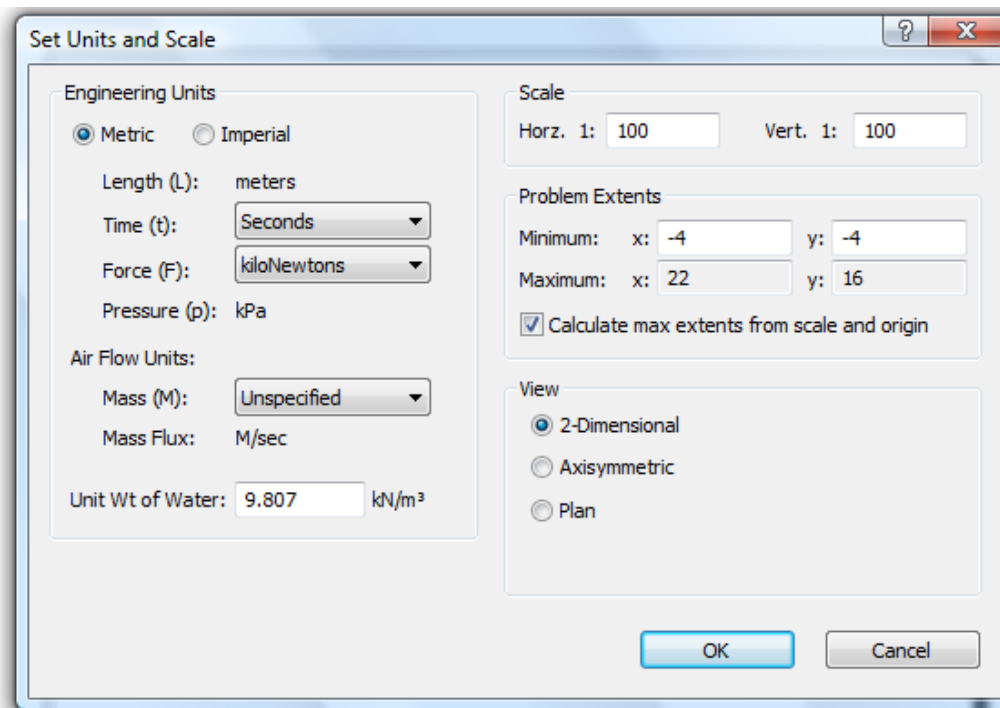
- Nos informa de la impresora preseleccionada introducimos en las casillas **Width** (ancho) y **Height** (alto) respectivamente los valores del tamaño del área de trabajo: 260 x 200.
- Aceptamos en OK.

### 2.3 Definición de la escala y unidades de cálculo

- . Seleccionamos **Units and Scale** en el desplegable **Set** tal como se indica en la siguiente figura



- Y aparecerá el cuadro de diálogo:



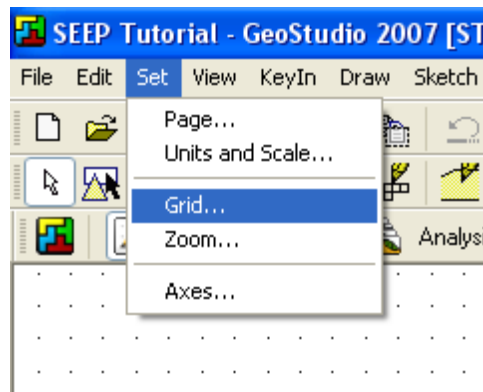
- Establecemos los límites en -4 (mínimo de X) y en -4 (mínimo de Y)
- La escala horizontal cambia a 100 y la vertical a 100.
- Marcamos como Unidades de ingeniería (Engineering Units) *Metric*
- Fijamos como unidades de Fuerza (Force) KiloNewtons
- Seleccionamos OK después de comprobar que la densidad del agua vale 9.807 KN/m<sup>3</sup>.
- Dejamos las demás casillas tal como marca la figura que nos aparece.

## 2.4 Definir el espaciado de malla

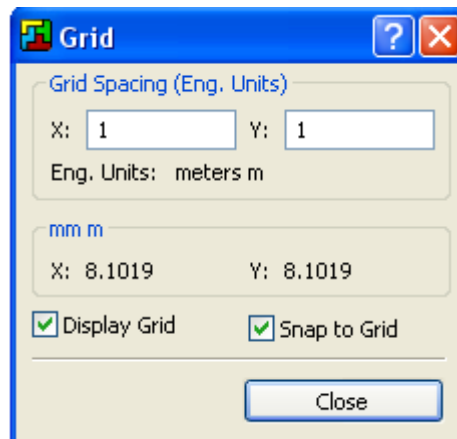
La visualización de la malla en el fondo del área de trabajo constituye una ayuda fundamental a la hora de dibujar y visualizar el perfil del talud. De tal modo que, se puede ajustar a la malla cualquier punto de nuestro perfil, esta herramienta es similar a las que existen en los programas de CAD.

Para definir la malla:

- Seleccionamos **Grid** en el desplegable **Set** y tal como se indica a continuación.



- Y aparecerá el cuadro de diálogo siguiente:

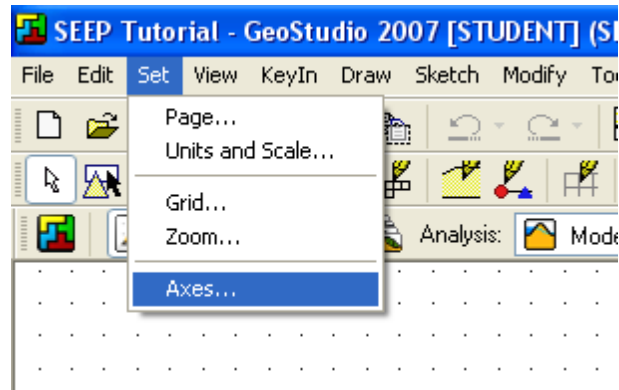


- Anotamos 1 en el espaciado de X y 1 en el de Y, para definir el espaciado de la malla.
- Nos informa de que el espaciado actual de la malla es de 8 mm.aproximadamente
- Seleccionamos las casillas **Display Grid** y **Snap to Grid** para mostrar y ajustar los pasos entre puntos de nuestro perfil de malla, si no queremos que se visualicen o se activen los pasos desactivamos la opción que nos interese.
- Pulsamos Ok y continuamos.

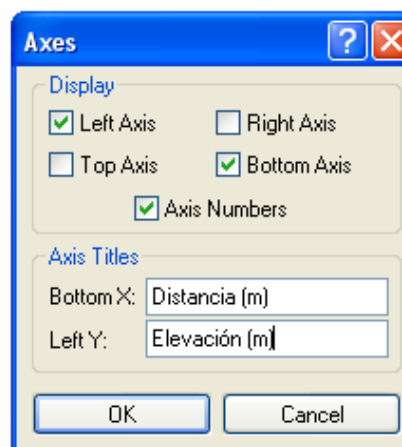
## 2.5 Ejes del boceto

Para definir los ejes del perfil y poder interpretarlo después de ser impreso, así como para poder acotar geoméricamente nuestro problema se debe proceder como sigue:

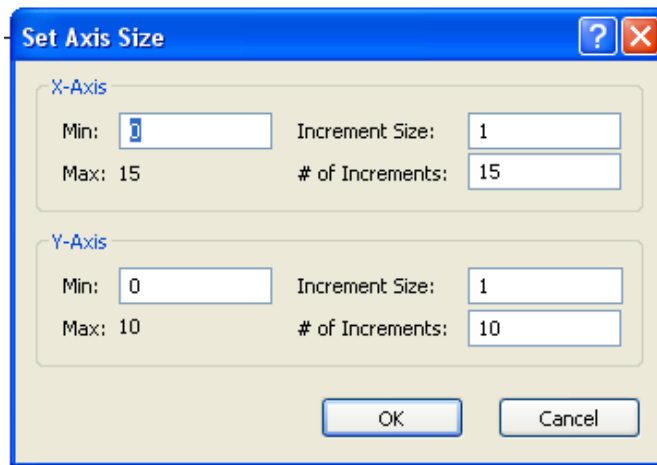
- Seleccionar **Set** del menú **Axes**.



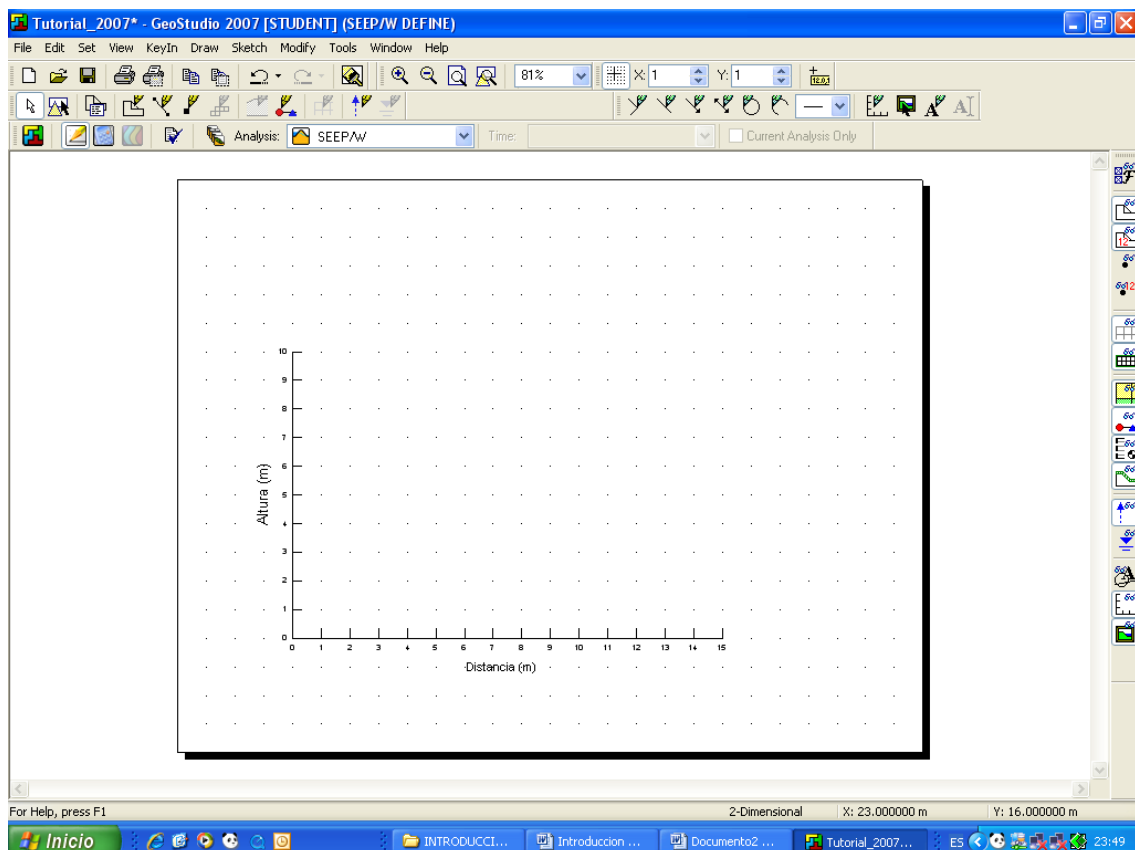
- El siguiente cuadro de diálogo aparecerá:



- Marcamos las casillas Left axis (eje izquierdo-ordenadas), Bottom Axis (inferior-abcisas) y Axis Number, es decir queremos que se visualicen los valores de situados en los ejes.
- Escribir el título de los ejes:  
Bottom X: Distancia (m).  
Left Y: Elevación (m).
- Pulsamos O.K y pasamos a la siguiente fase del cuadro de diálogo
- Se colocan los valores que se indican en la figura adjunta



- Pulsamos O.K y continuamos dando como resultado:

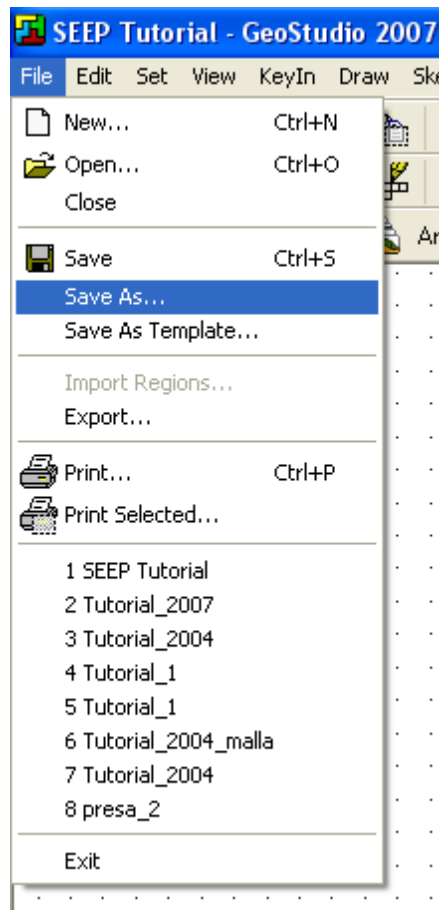


## 2.6 Guardar el archivo del problema

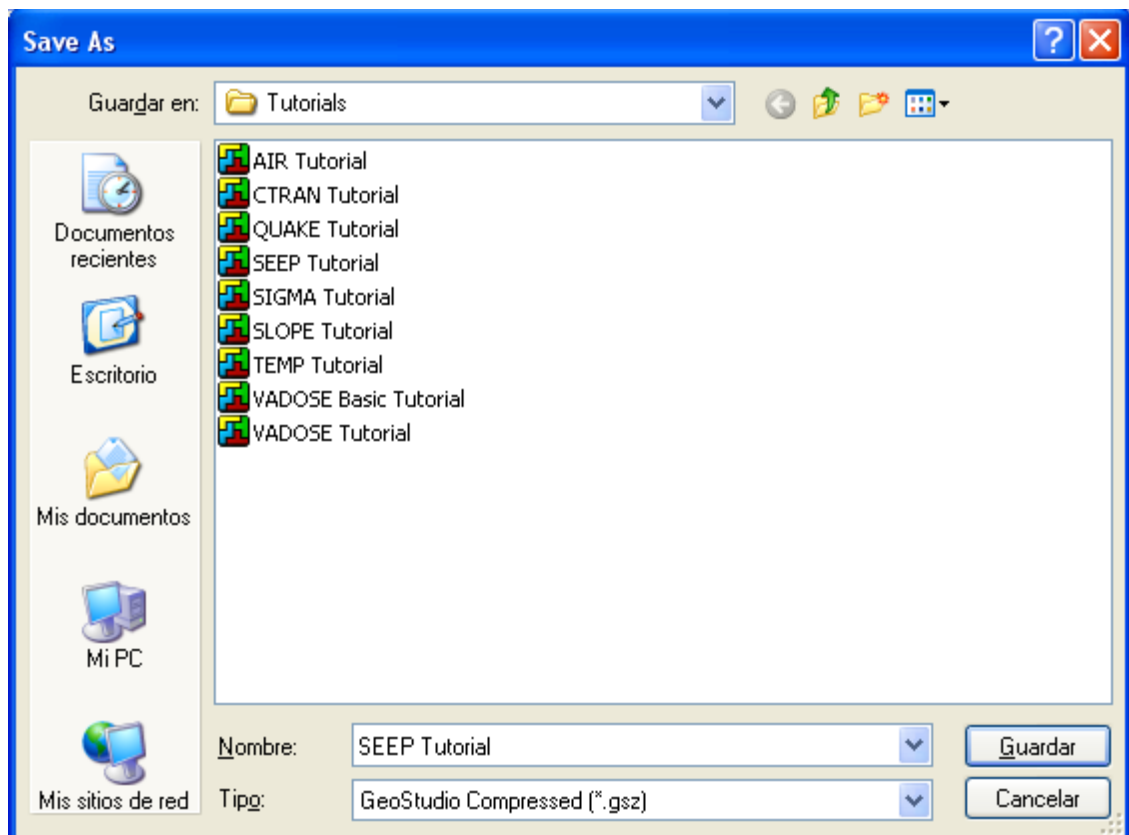
Es una buena práctica comenzar a guardar el archivo de nuestro trabajo, además de almacenar su información en un directorio de trabajo se le asigna un nombre relacionado con la trabajo a realizar, las extensiones de esta versión son **GSZ** que son formatos comprimidos cuya lectura se puede hacer con cualquier programa del paquete Geostudio, leyendo sólo la parte que le puede ser útil.

Para grabar el problema:

- Seleccionamos **Save as** en el menú desplegable **File** tal como vemos a continuación:



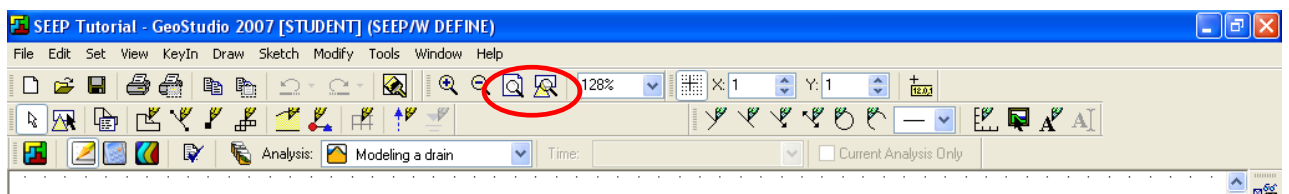
- Y aparecerá el cuadro de diálogo siguiente:



- Seleccionamos la carpeta donde queremos guardar nuestro archivo y asignamos un nombre relacionado con el proyecto en el que estamos trabajando por ejemplo: Seep Tutorial.gsz.
- OK para aceptar y salir.
- Para guardar en sucesivos cambios en el mismo archivo, sólo es necesario seleccionar **Save** en lugar de **Save as**.

## 2.7 Realizar un zoom sobre el trabajo.

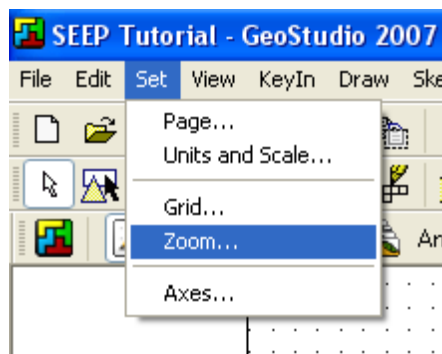
Antes de comenzar y cuantas veces lo necesitemos realizaremos un zoom sobre la pantalla usando los métodos que aparecen en la tabla de herramientas, marcados en rojo:



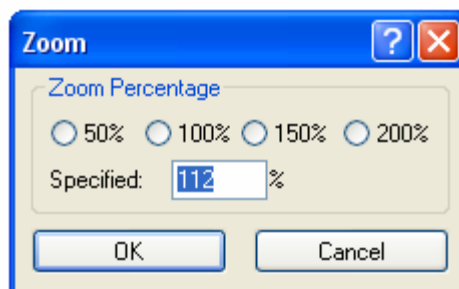
En la anterior figura se sitúan las herramientas para realizar un Zoom, esta imagen se presenta con más detalle en la siguiente figura.



- Situándose a la izquierda **Zoom Page** que realiza un zoom sobre los márgenes de la página y a la derecha **Zoom Objects** que realiza un zoom sobre los elementos activos.
- O también se puede realizar seleccionando **Zoom** del menú de **Set** tal como se ve en la siguiente figura:



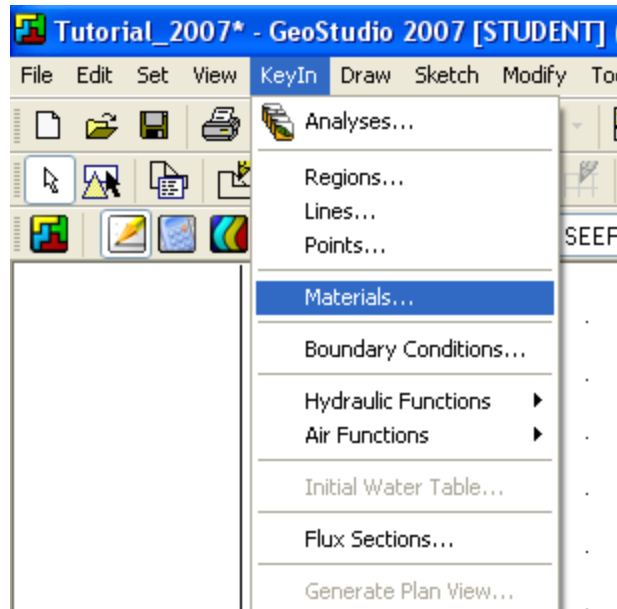
- Aparecerá el siguiente cuadro de diálogo donde podremos poner en factor de zoom que más nos interese



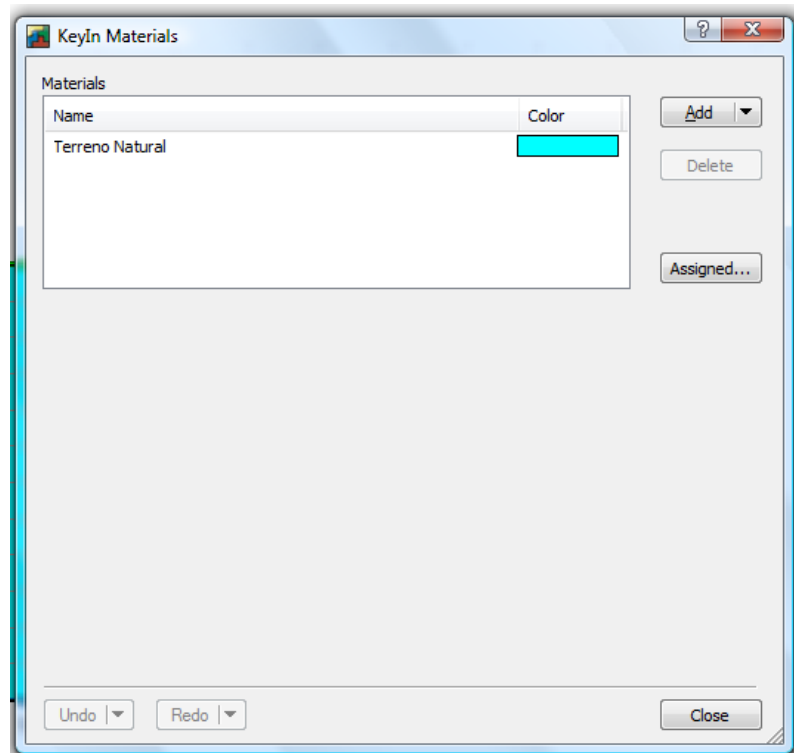
## 2.8 Definir las propiedades de los suelos

- Para definir las propiedades de los suelos:

- Seleccionar **Materiales** en el menú desplegable **KeyIn.**, tal como se ve en la siguiente figura.

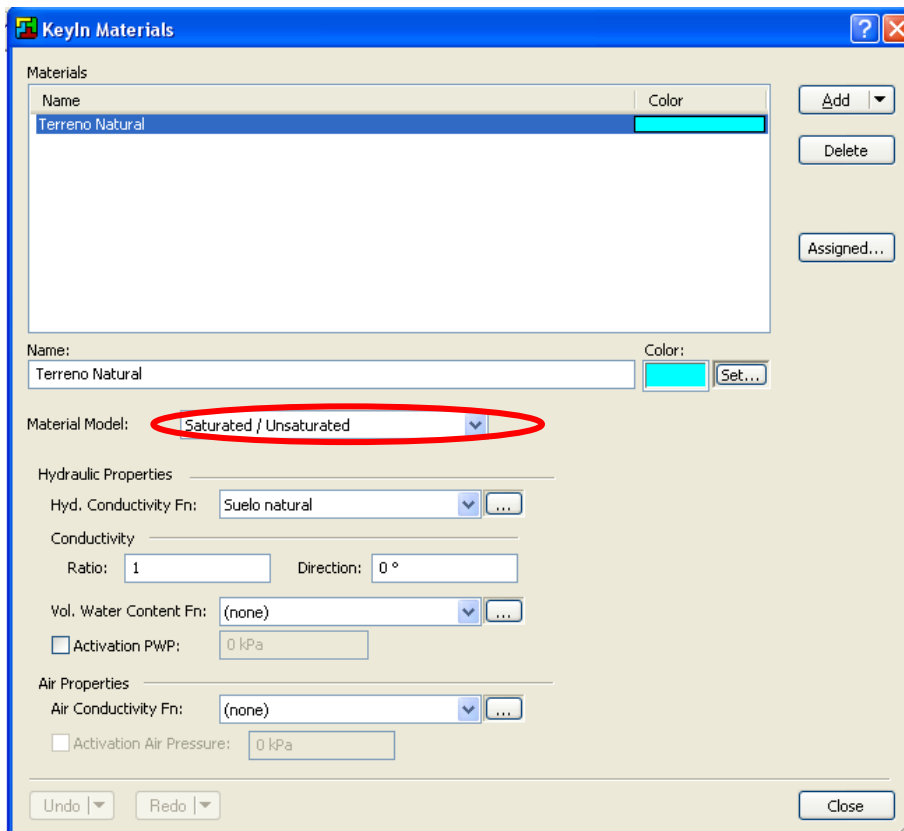


- Una vez hecho en clic aparecerá el siguiente cuadro de diálogo



Aparece la lista de materiales, ya hay uno creado denominado Terreno natural, lo normal es que aparezca uno con denominación New Material

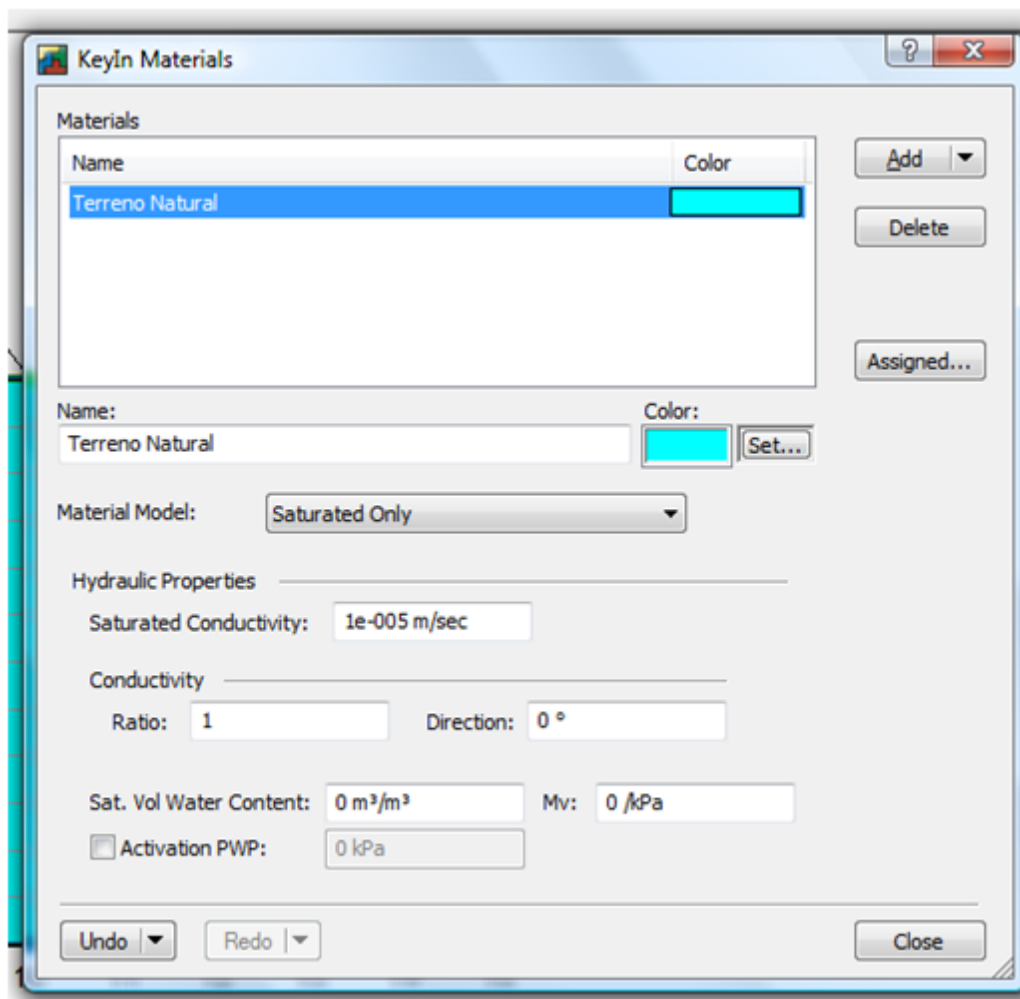
Pulsando en él obtenemos la siguiente ventana.



The screenshot shows the 'KeyIn Materials' dialog box. At the top, there is a list of materials with columns for 'Name' and 'Color'. The material 'Terreno Natural' is listed with a cyan color. To the right of the list are buttons for 'Add', 'Delete', and 'Assigned...'. Below the list, there are input fields for 'Name' (Terreno Natural) and 'Color' (cyan), with a 'Set...' button. The 'Material Model' dropdown is set to 'Saturated / Unsaturated' and is circled in red. Below this are sections for 'Hydraulic Properties' and 'Air Properties'. Under 'Hydraulic Properties', there is a dropdown for 'Hyd. Conductivity Fn' set to 'Suelo natural', and a 'Conductivity' section with 'Ratio' set to 1 and 'Direction' set to 0°. Under 'Air Properties', there is a dropdown for 'Air Conductivity Fn' set to '(none)'. At the bottom, there are 'Undo' and 'Redo' buttons, and a 'Close' button.

Vamos a definir en este cuadro de diálogo las características del comportamiento en cuanto a las condiciones de permeabilidad de los suelos que vamos a estudiar, en este caso sólo un suelo.

Comentamos a continuación los contenidos de los casilleros del cuadro de dialogo y su contenido:



- En el cuadro **Name** indicamos el nombre del terreno al que vamos a asignar los parámetros, para introducir más terrenos pulsamos en **Add** en la parte arriba derecha y para borrar suelos, primero los marcamos y después pulsamos **Delete** justo debajo de Add
- En la opción, **Material Model** seleccionar la otra opción Saturated Only (Sólo saturado).

En la opción **Hydraulic Properties** vamos a definir las características hidráulicas de nuestro suelo, en este caso pulsamos el botón que aparece a la derecha de la opción tal como se ve en la marcado en rojo en la figura siguiente.

En el casillero **Saturated Conductivity** se introduce el valor del coeficiente de permeabilidad (en m/sg), en este caso  $10^{-5}$  m/sg.

En las opciones de abajo **Ratio** 1 significa  $K_x/K_y=1$  es decir no hay variación del coeficiente de permeabilidad vertical con respecto a la horizontal y **Direction** 0° significa que la permeabilidad es isotrópica.

En la parte inferior de la ventana existen dos casilleros :

**M<sub>v</sub>** corresponde al coeficiente de compresibilidad volumetrica, sólo se usaría en la zona insaturada del suelo

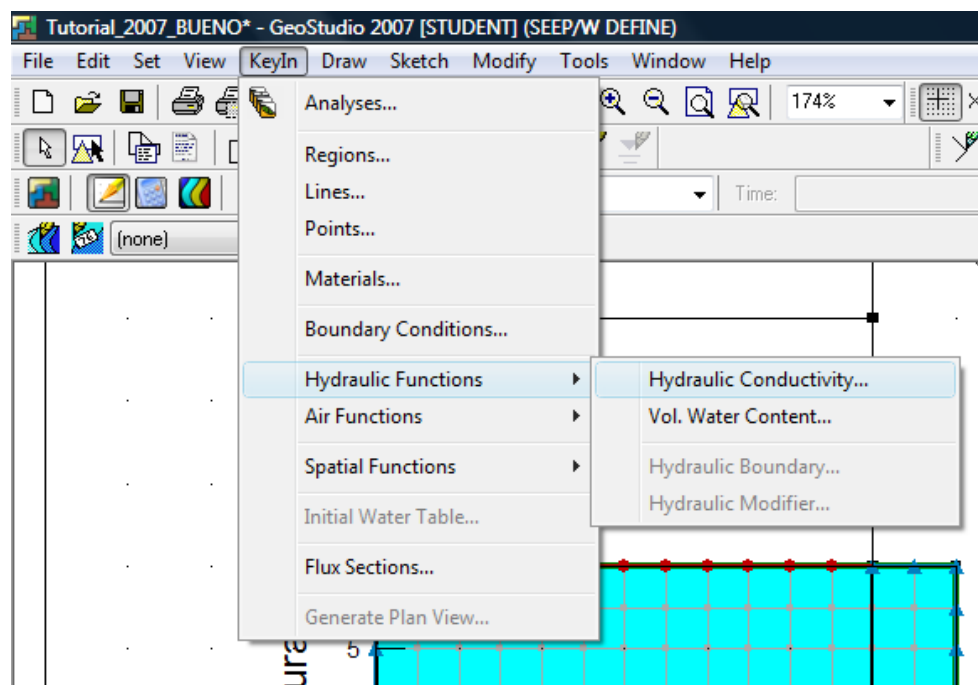
**Sat. Vol Water Content** especifica un contenido de agua constante y resulta de multiplicar la porosidad por el coeficiente de saturación.

Pulsamos Close.

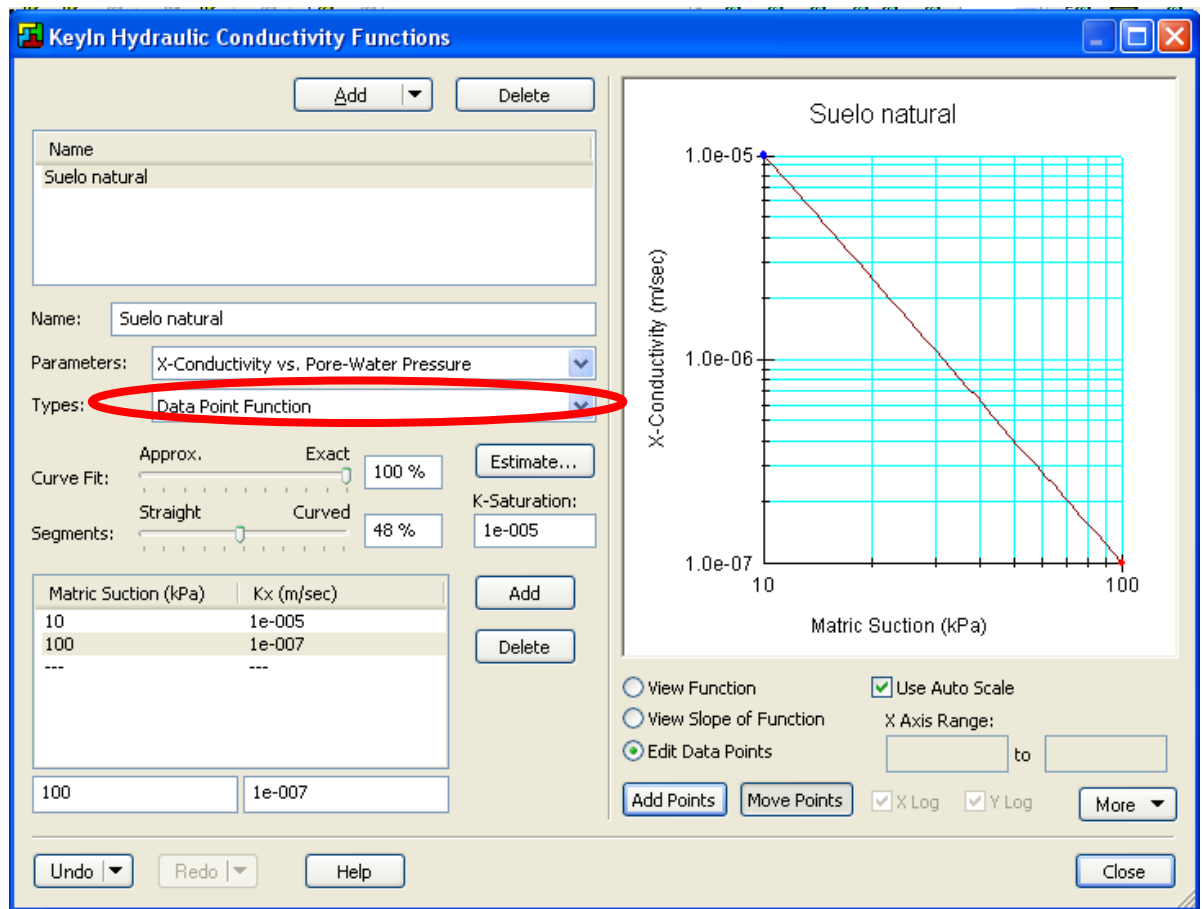
## 2.9 Funciones de conductividad hidráulica.

En el caso de suelo parcialmente saturados (que no es el nuestro) es necesario definir funciones de flujo que relacionen el coeficiente de permeabilidad con la presión de succión

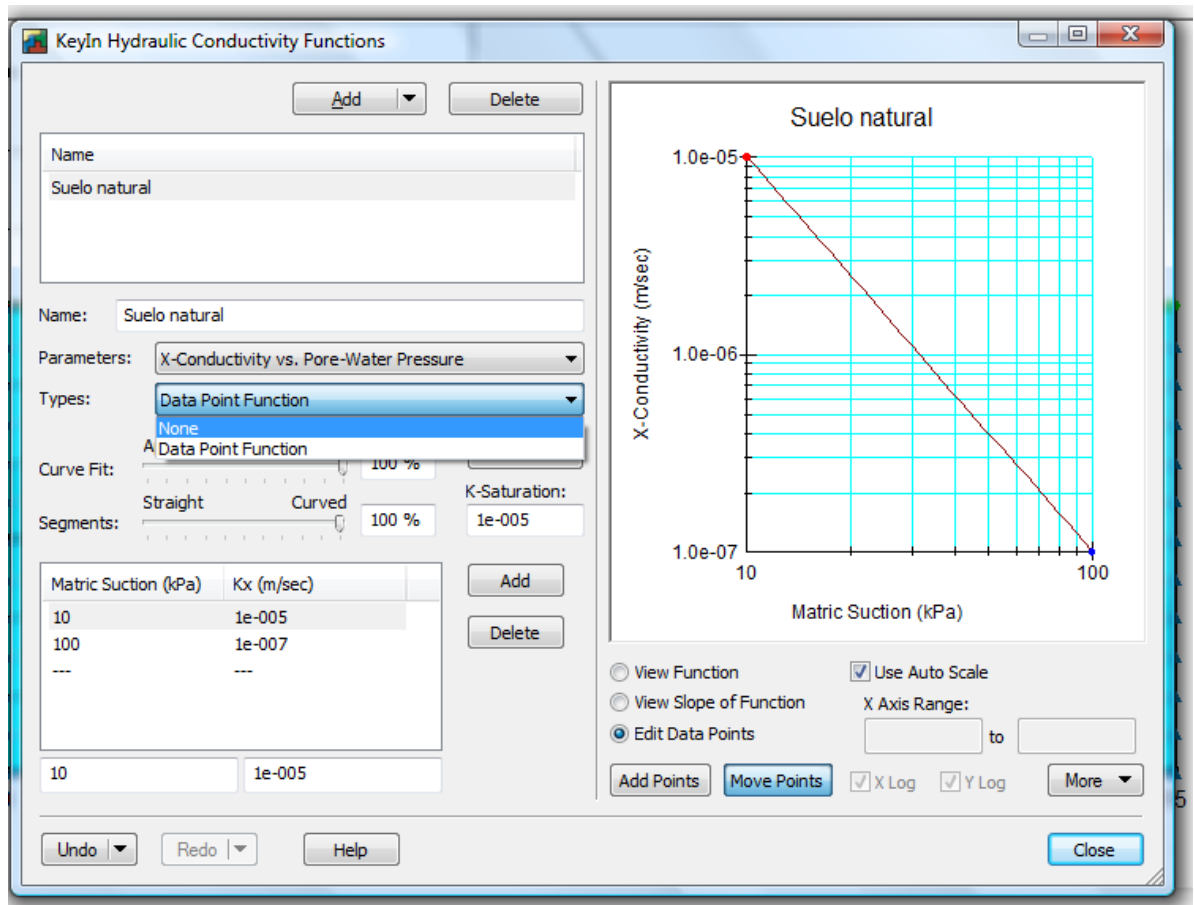
En el menú activamos KeyIn/Hydraulic Functions/Hydraulic Conductivity tal como se ve en la siguiente figura:



Nos aparecerá el siguiente cuadro de diálogo:

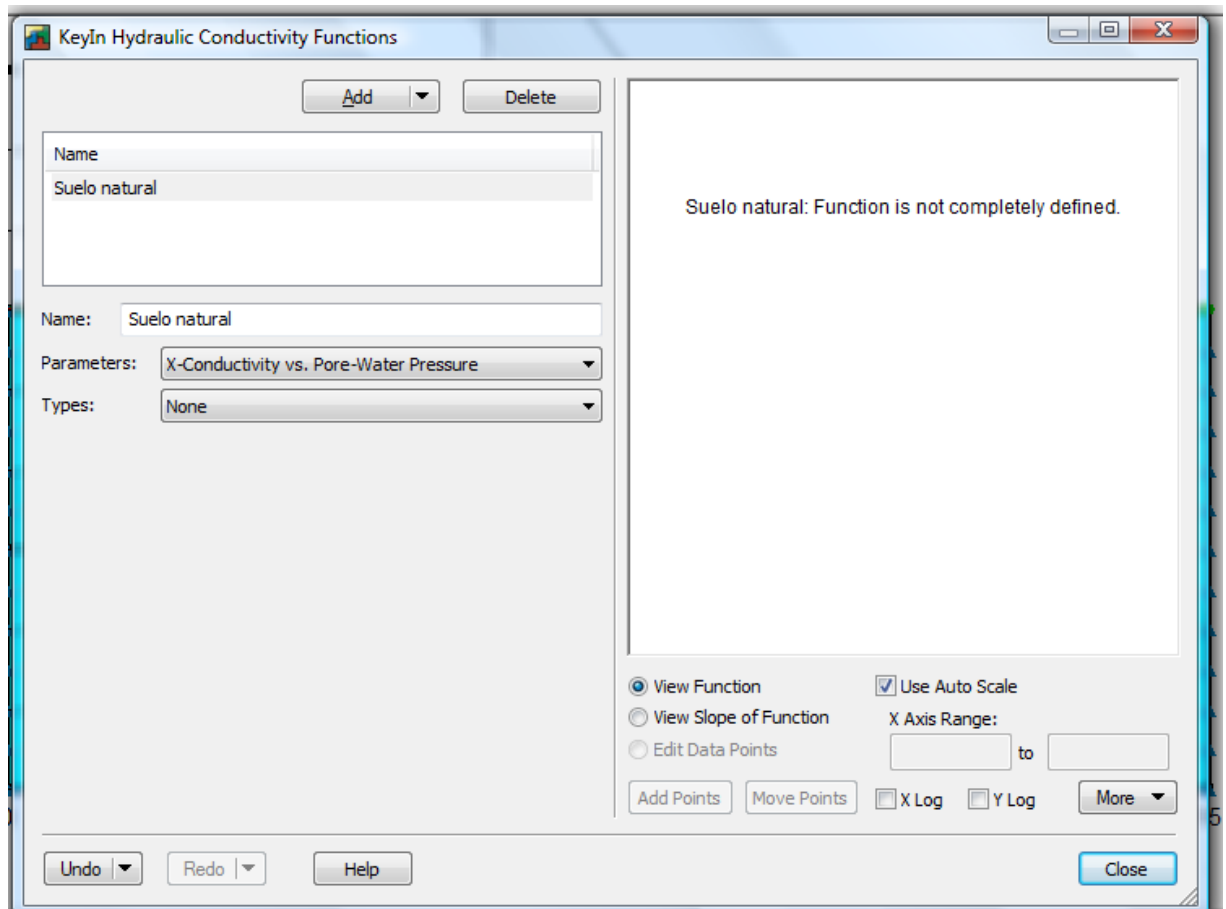


En la opción **Types** activamos **None**



Con esta opción desactivamos la función de conductividad, que en suelos saturados no es necesaria.

Nos aparece el siguiente resultado:

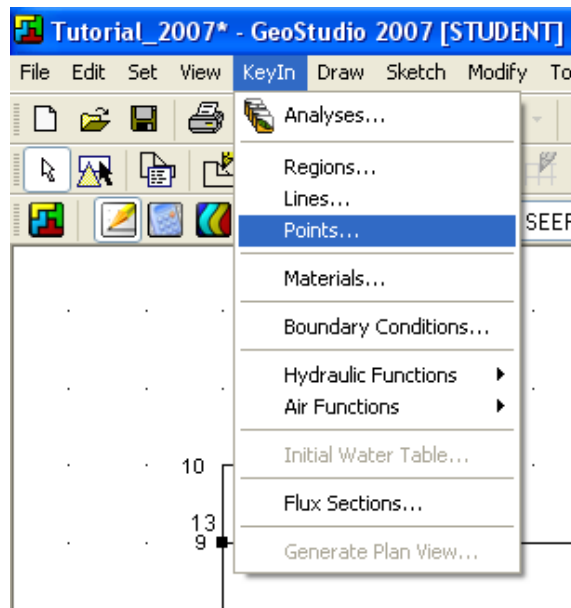


- Pulsamos **Close**

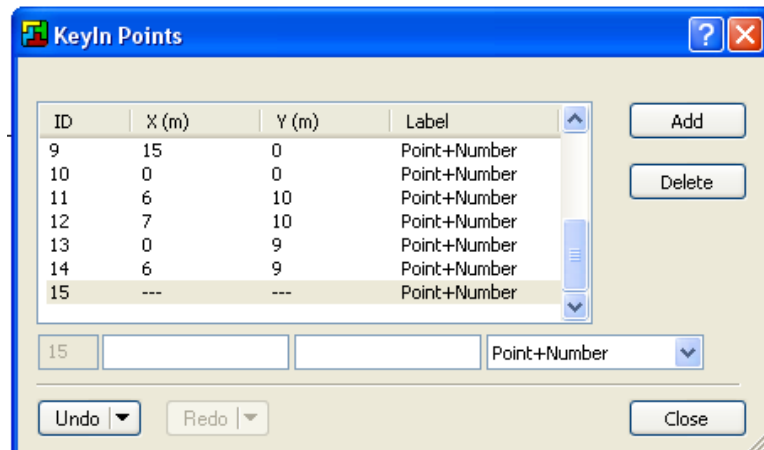
## 2.10 Introducir los puntos de los contornos

Para definir los contornos del perfil, vamos a introducirlos numéricamente aunque existe una opción de introducción de forma gráfica, se procede de la siguiente forma

- Seleccionar **Points** en el menú desplegable **KeyIn.**, tal como se ve en la siguiente figura.



- Apareciendo el siguiente cuadro de diálogo

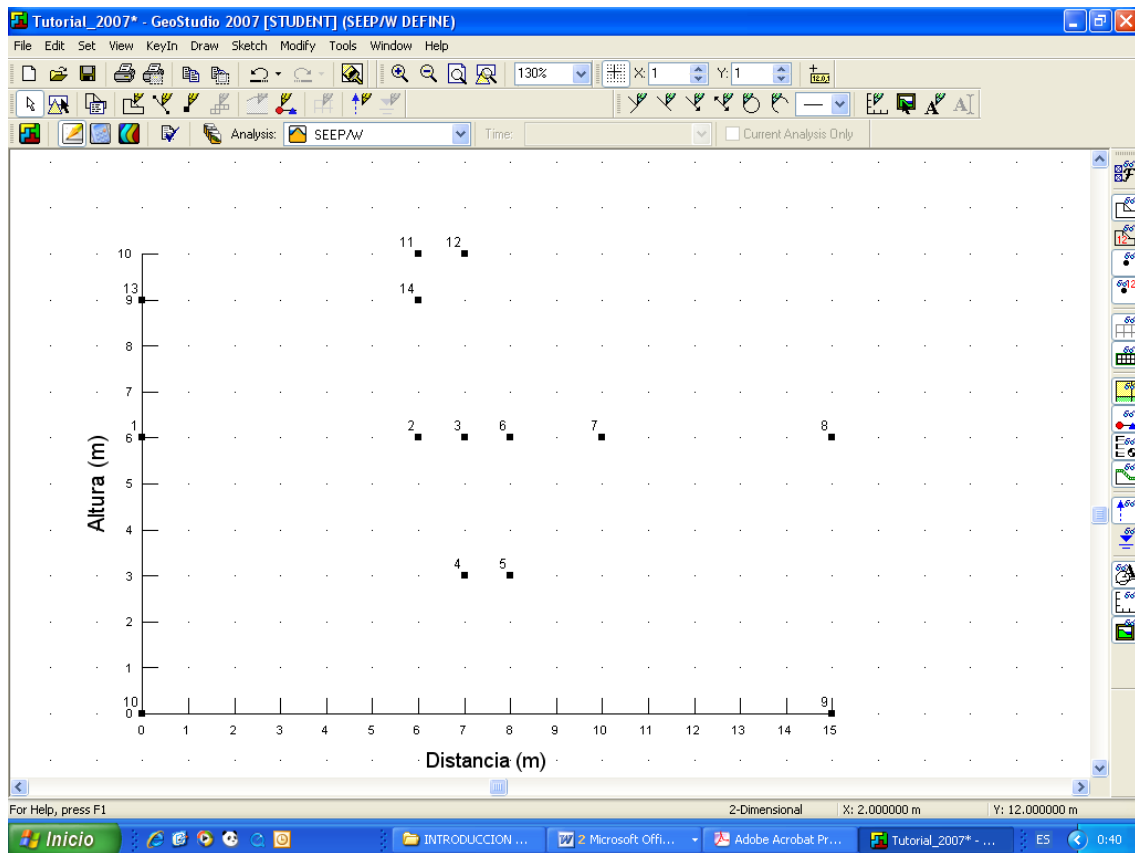


- En la casilla ID se introduce automáticamente el número de orden, en las otras dos las coordenadas x e y respectivamente y en la lista desplegable se activa la opción Point+Number
- Se introducen los siguiente puntos que definen la geometría.

TABLA 2. PUNTOS DEL CONTORNO		
1	0.00	6.00
2	6.00	6.00
3	7.00	6.00
4	7.00	3.00
5	8.00	3.00
6	8.00	6.00
7	10.00	6.00
8	15.00	6.00
9	15.00	0.00
10	0.00	0.00
11	6.00	10.00
12	7.00	10.00
13	0.00	9.00
14	6.00	9.00

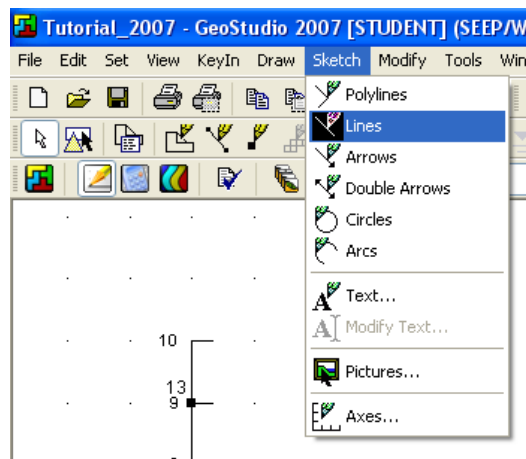
- Tras la introducción de cada punto se pulsa Enter y se introducen en la lista, para ver los puntos en la pantalla se pulsa **Apply** y ya se pueden visualizar.
- Existe también las opciones **Add** y **Delete** para introducir y borrar números respectivamente
- La introducción de los datos termina pulsando **Close**.

La introducción de los puntos en este orden da como resultado lo indicado en la siguiente figura:



## 2.11 Visualización de contornos.

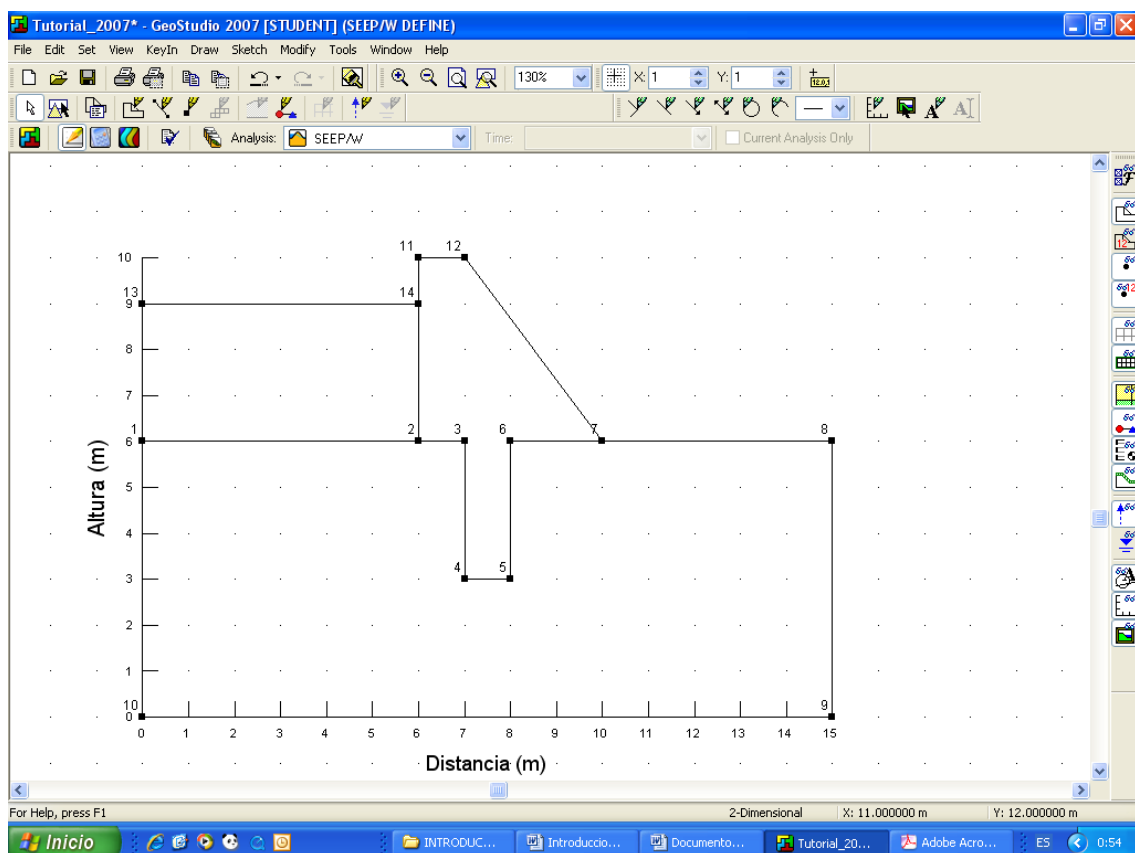
Con objeto de visualizar la geometría de nuestro problema vamos a usar la opción **Lines** de la opción de menú **Sketch**, como se indica en la siguiente figura:



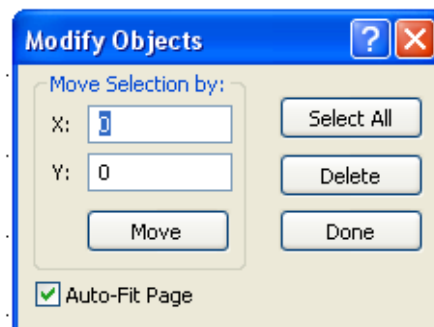
Al elegir la opción desaparecerá el puntero del ratón para aparecer una cruz con la que haremos clic entre los dos puntos que queramos unir mediante una línea.

El resultado ha de ser similar al del croquis que tengamos previo a la introducción de los datos.

Por lo que será similar al de la siguiente figura.



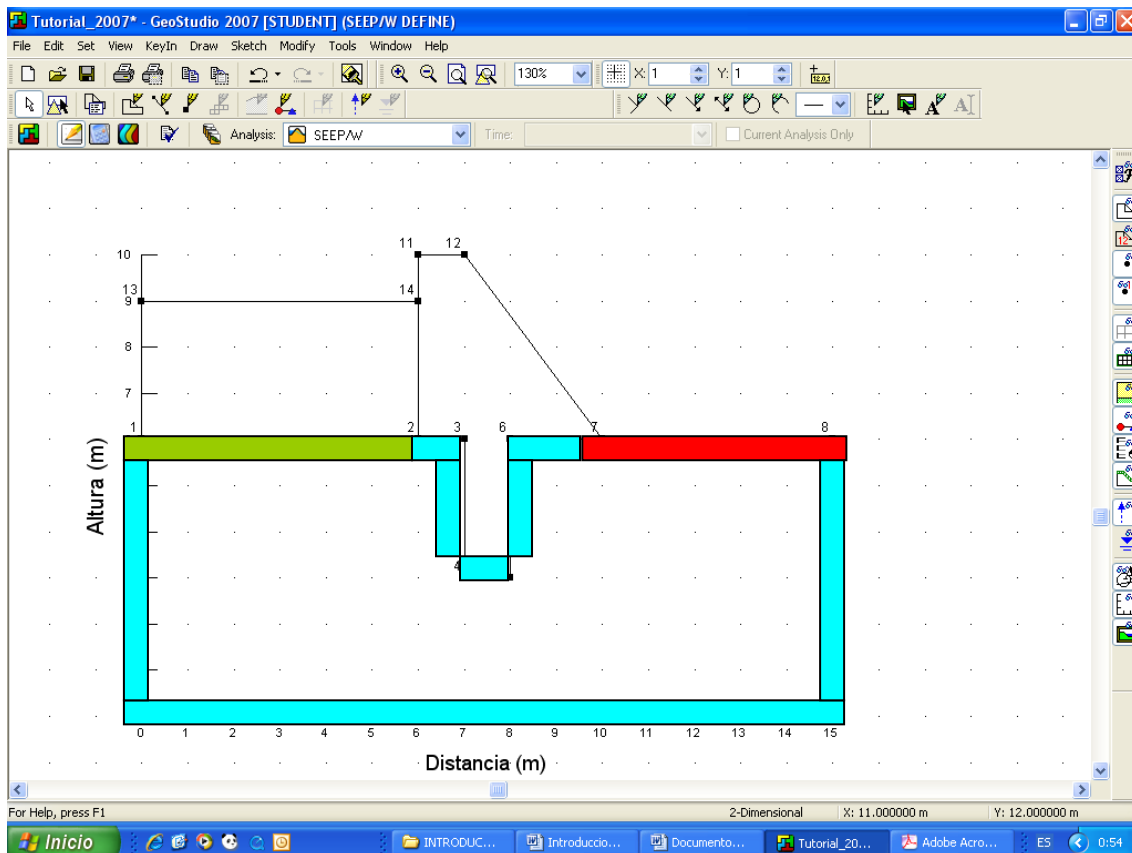
Si cometemos algún error o queremos eliminar alguna línea o punto usamos la opción **Modify Objets** o el icono marcado en rojo, esta opción nos permite mover y borrar entidades tales como líneas, puntos, regiones etc.



Seleccionamos el objeto u objetos que queremos mover o copiar y después de realizar las operaciones posibles de Borrar (**Delete**) o mover (**Move**) pulsamos en **Done**.

## 2.12 Condiciones de Contorno

Antes de definir las propiedades de los terrenos que van a estar implicados en el cálculo vamos a definir las condiciones de contorno que definen las fronteras del modelo matemático que vamos a construir



Se definen las siguientes condiciones de contorno:

- Zonas impermeables que coinciden con el cimiento de la presa y con la pantalla impermeable colocada debajo de ésta.
- Zonas del terreno natural consideradas como frontera lo suficientemente alejadas como para no influir o que sean ejes de simetría, considerados como impermeables.
- Zonas del terreno sometidas a presiones de agua

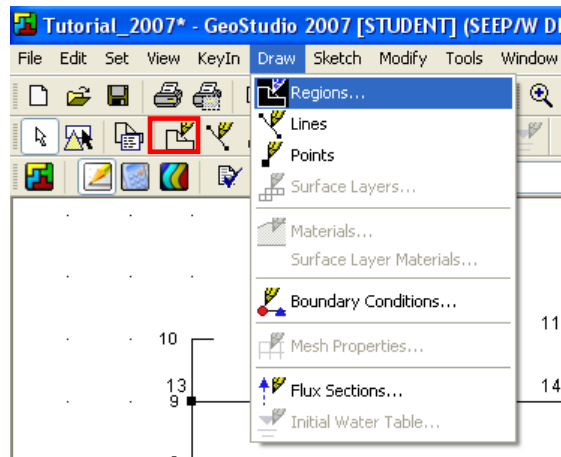
Las zonas marcadas de color celeste se consideran impermeable y las zonas marcadas en verde o rojo están sometidas a distintas presiones.

## 2.13 Regiones

Como modificación fundamental de la metodología de introducción de las zonas con los distintos tipos de suelos de versiones anteriores del programa, en esta versión 2007 se mantiene el innovador método de las regiones que puede introducirse de dos

formas identificando puntos o mediante una herramienta Cad que dispone el programa, usaremos esta última opción.

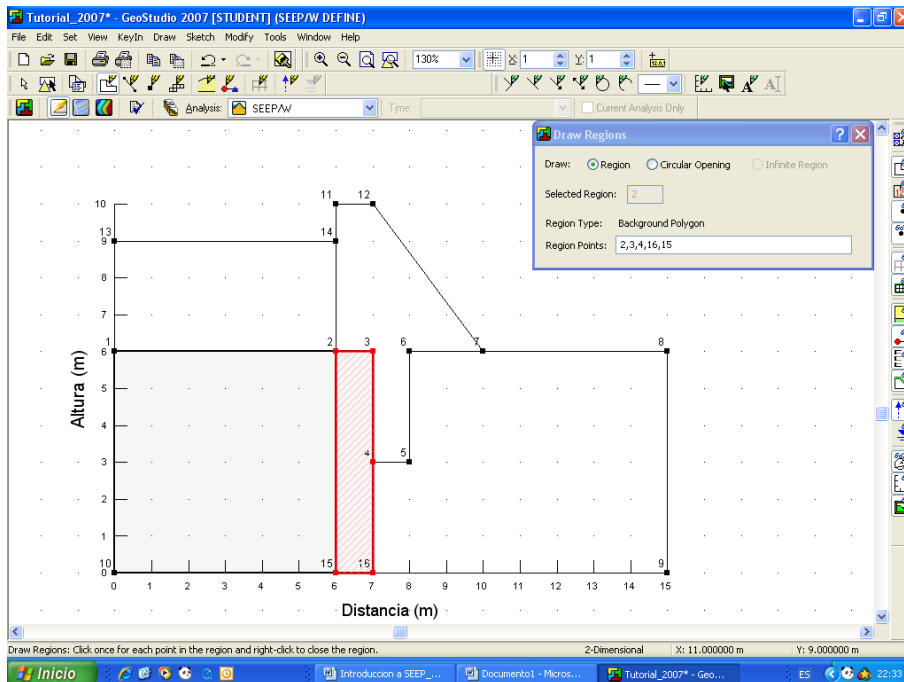
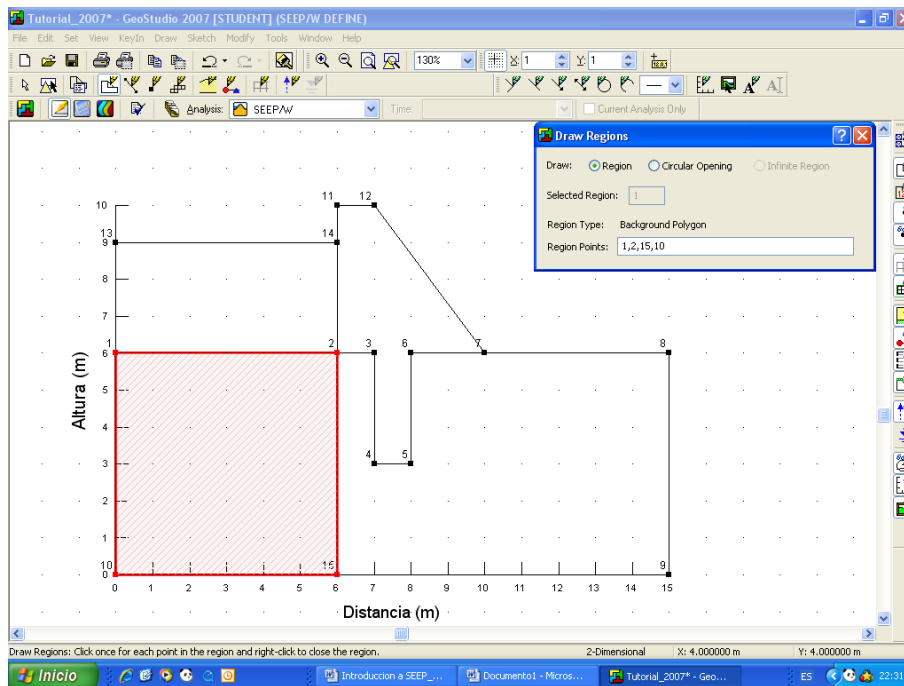
- Seleccionamos **Region** en el menú desplegable **Draw.**, tal como se ve en la siguiente figura.

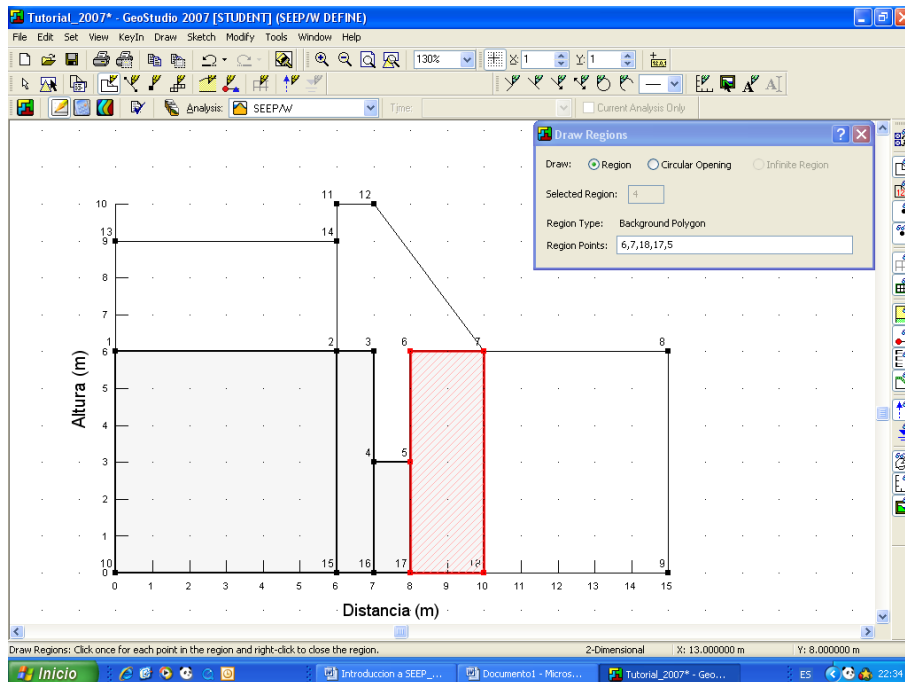
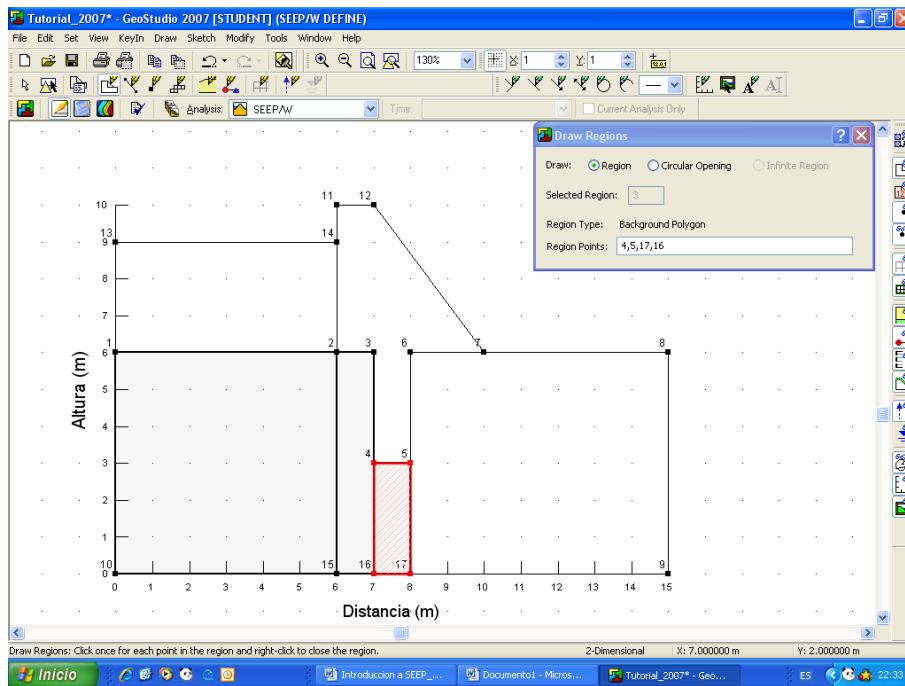


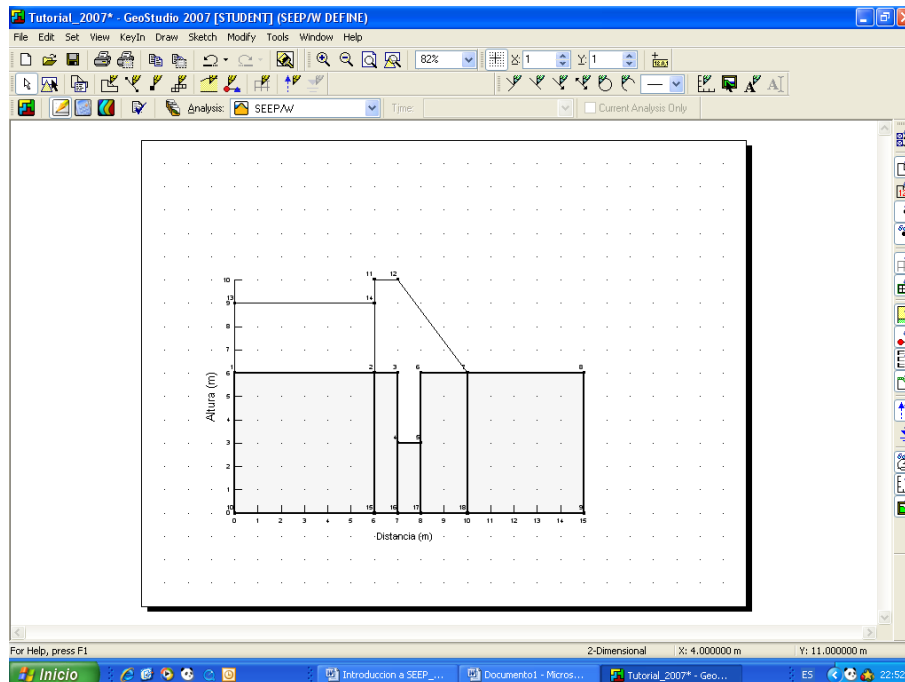
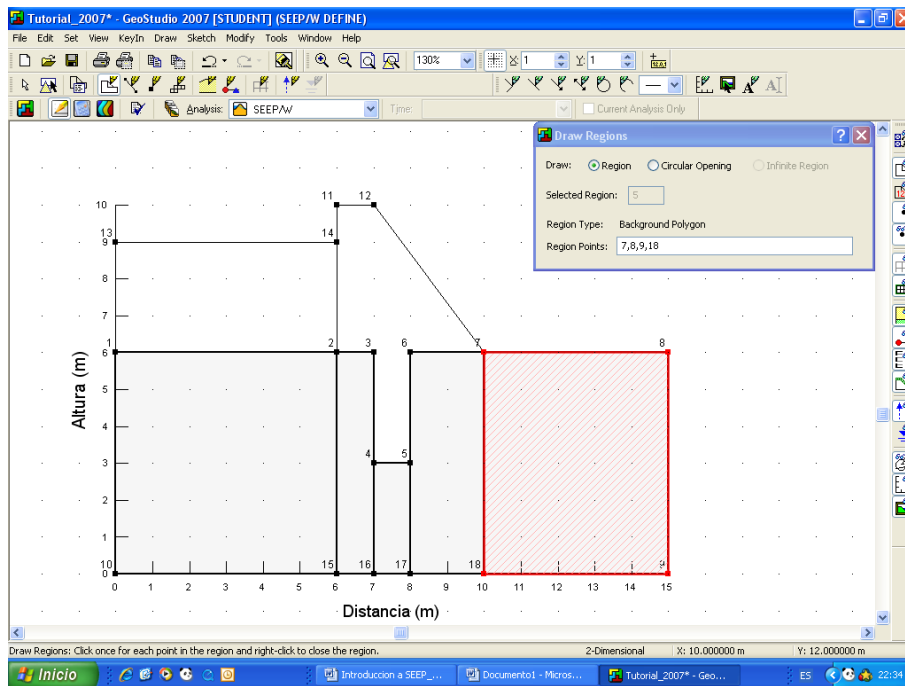
O pulsando en el icono de la barra de herramientas marcado con un rectángulo en rojo

Las regiones definen zonas con materiales de distinta permeabilidad y zonas con el mismo material pero distintas condiciones de contorno.

- Se va pulsando con el botón izquierdo del ratón los puntos que definen el contorno cerrando el contorno en el punto de origen



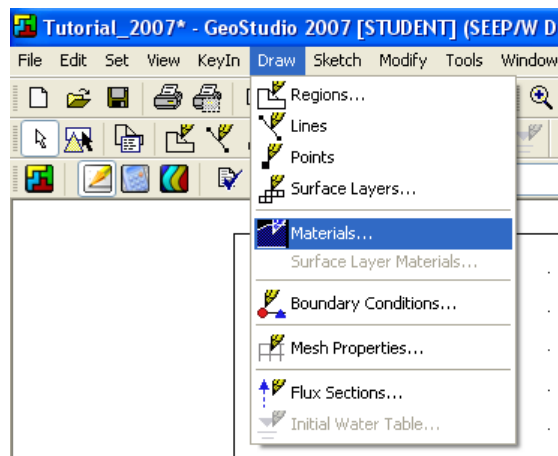




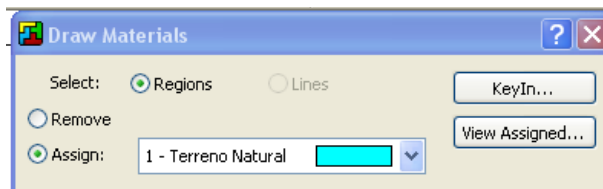
## 2.14 Asignación de materiales

Una vez hemos definido las regiones, tenemos que asignar propiedades de los suelos que definen el modelo del problema que vamos a manejar, para ello seguimos los siguientes pasos:

En la opción **Draw** del menú seleccionamos la opción **Materials**, tal como se ve en la siguiente figura.



Tras lo cual aparecerá la siguiente ventana.

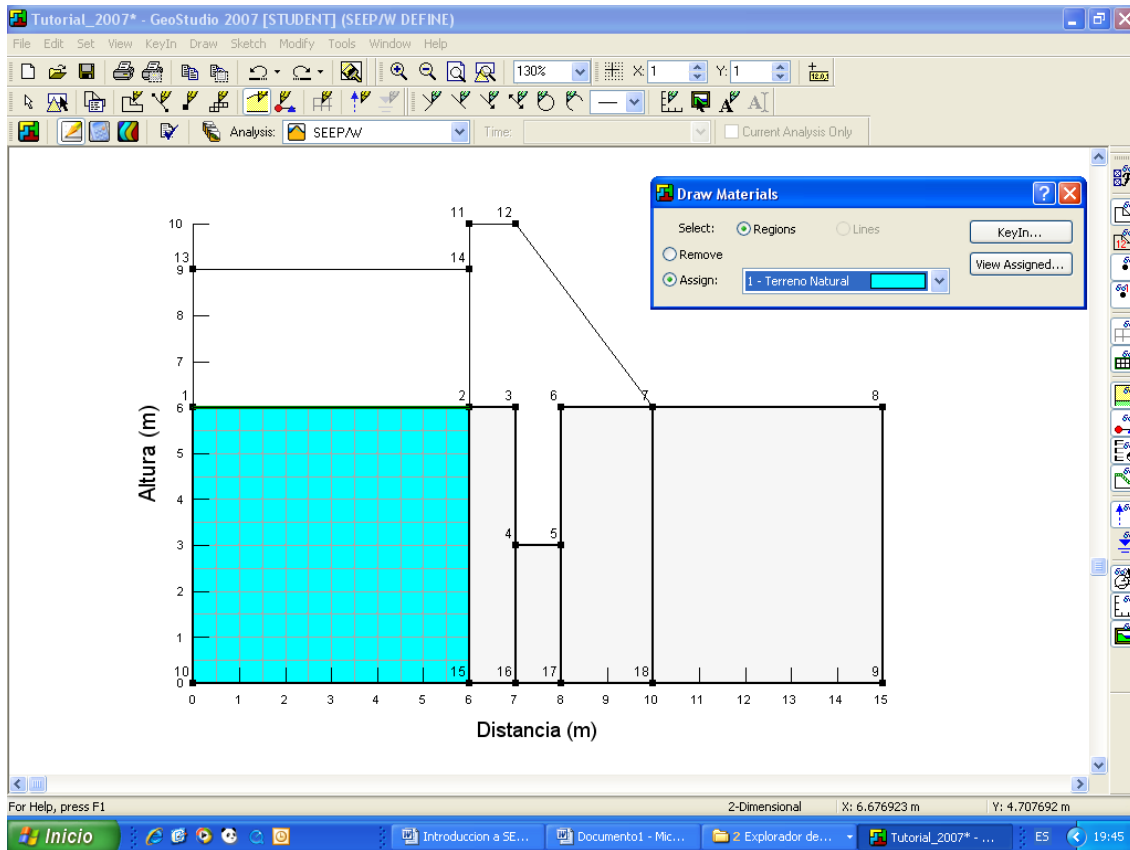


En la zona central inferior hay una lista desplegable, en ella seleccionaremos el tipo de suelo que queremos asignar a una región en concreto.

A la izquierda de esta hay dos opciones: Remove y Assign, que se usan para eliminar una asociación entre región y tipo de suelo la primera y para asignar las propiedades de un suelo a una región determinada la otra.

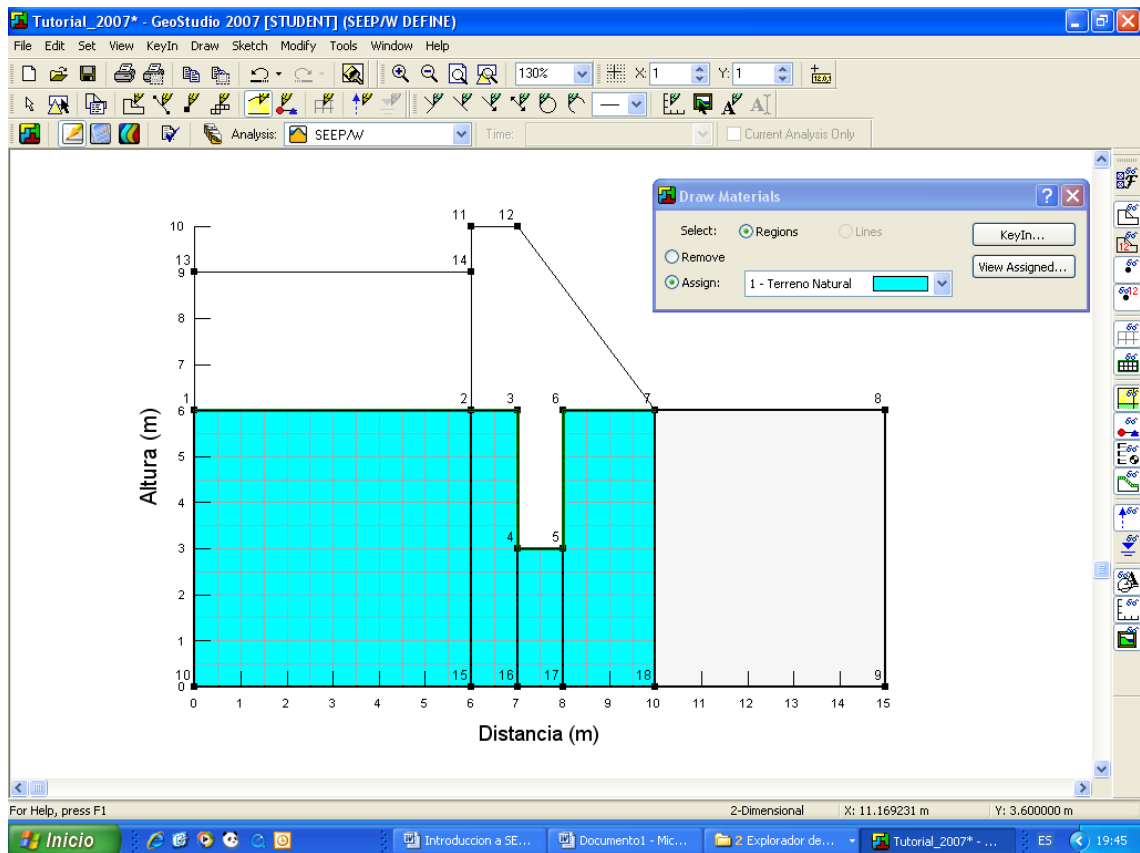
A la vez que se visualiza la ventana aparecerá un cuadrado oscuro en la punta del cursor que nos servirá para indicar a que zonas asignamos un tipo de suelo y a cuales le asignamos otro, siempre dentro de la zona acotada por una región. En nuestro ejemplo sólo hay un tipo de suelo.

Pinchando sucesivamente en las demás regiones, tal como se ve en la figura adjunta.



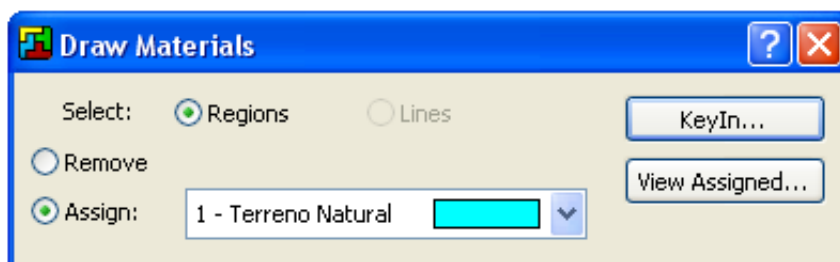
Después de pinchar en todas las regiones en las que queremos asignar el tipo de suelo con sus correspondientes propiedades asociadas.

Obtendremos un resultado similar al obtenido en la salida gráfica siguiente:

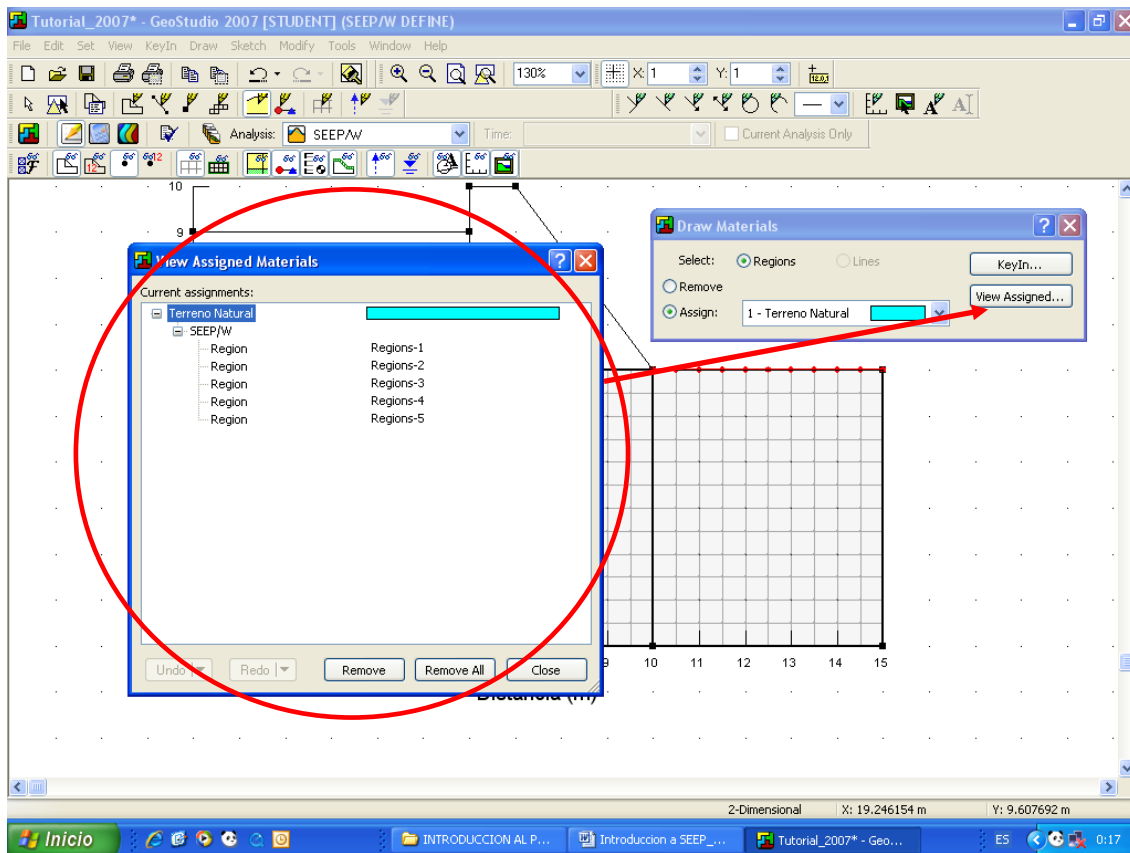


Por lo que hemos asignado propiedades de suelo a las regiones que habíamos definido anteriormente.

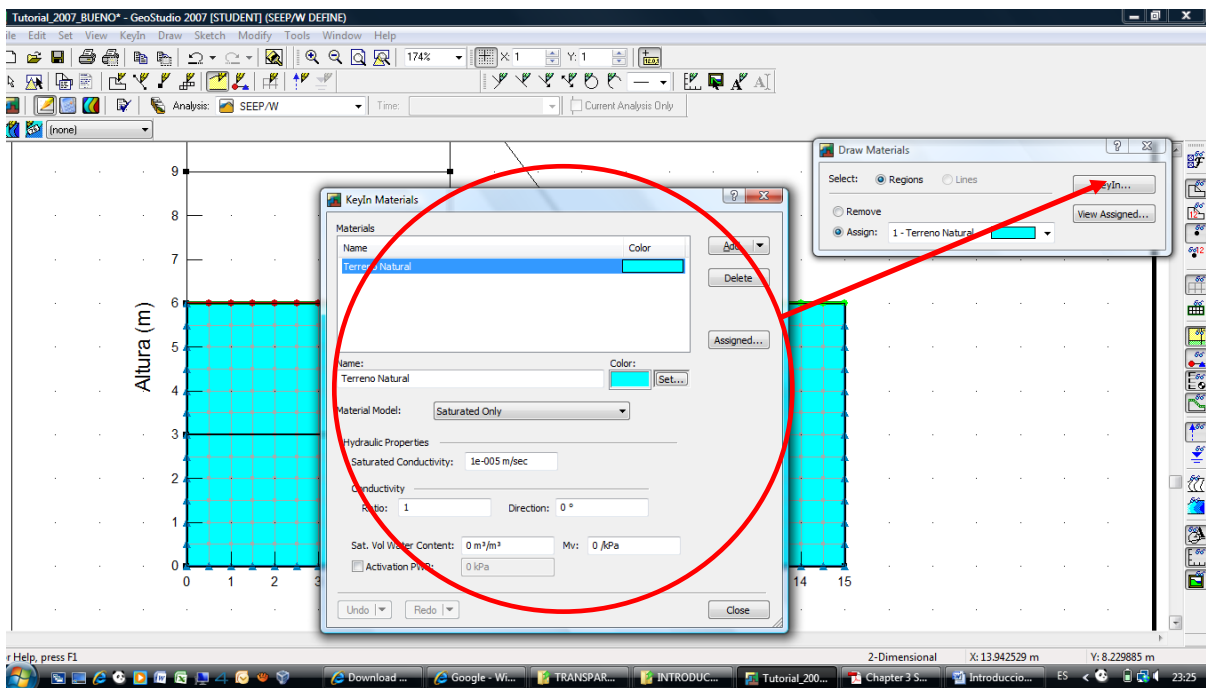
Existen dos opciones interesantes en la ventana de asignación de suelos, estas se indican en la siguiente figura



Estas opciones son, **View Assigned** que si se pulsa aparece una ventana con las regiones que tienen asignado un determinado suelo tal como puede apreciarse en la siguiente figura.

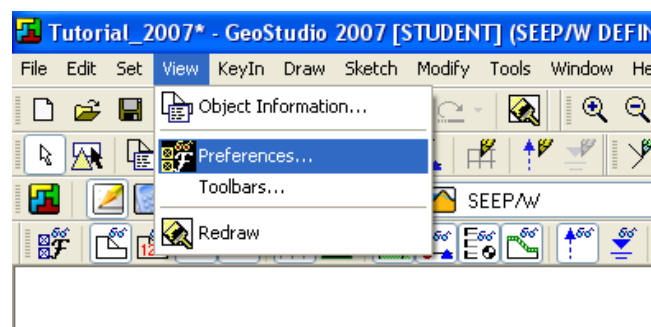


Y si pulsamos la opción KeyIn aparecerán las opciones que definen un suelo determinado, por lo que podremos cambiar sus propiedades e incluso generar suelos nuevos sin salir de esta opción, se puede apreciar en la siguiente figura:

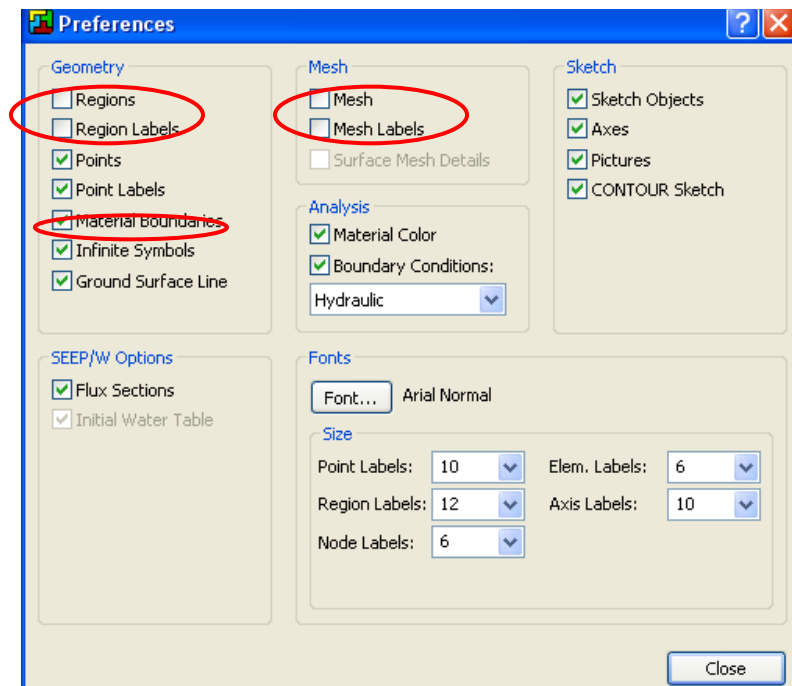


Para salir de esta subopción pulsamos Close y una vez terminada la introducción de suelos pulsamos las aspas de la zona superior derecha de la ventana de opciones de introducción de suelos.

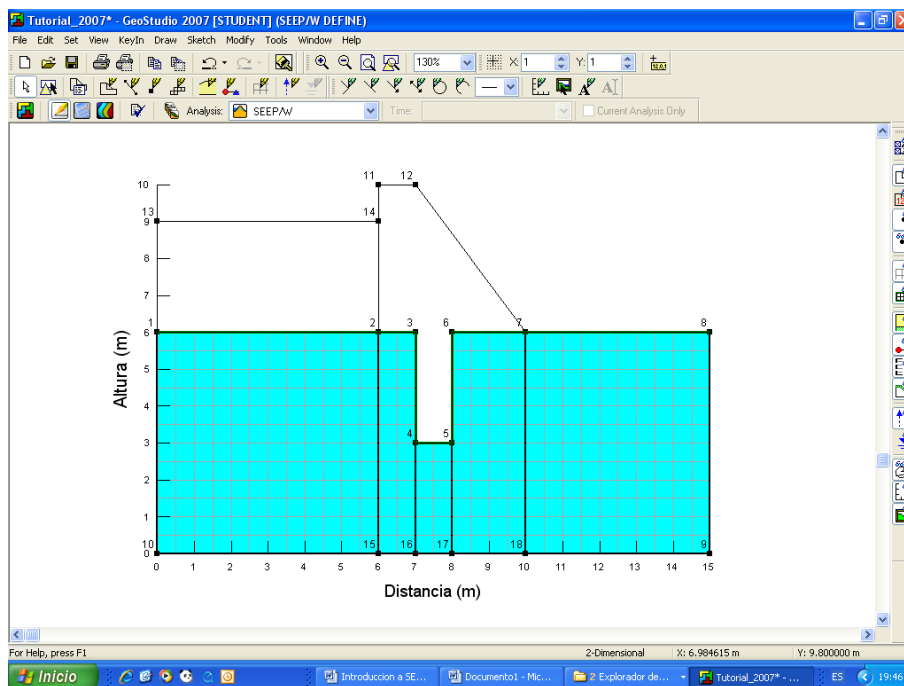
Dentro de las opciones del programa está la de ocultar las divisiones de las regiones mediante el comando **Preferences** de la opción de menú **View**, tal como se ve en la figura adjunta:



Nos aparece el siguiente cuadro de diálogo, desactivamos las opciones Regions, Regions Labels, Mesh, Mesh Labels y activamos Material boundaries, con lo que el aspecto estético del modelo aparecerá más claro.



Lo que nos daría un resultado tal como se ve en la siguiente figura:

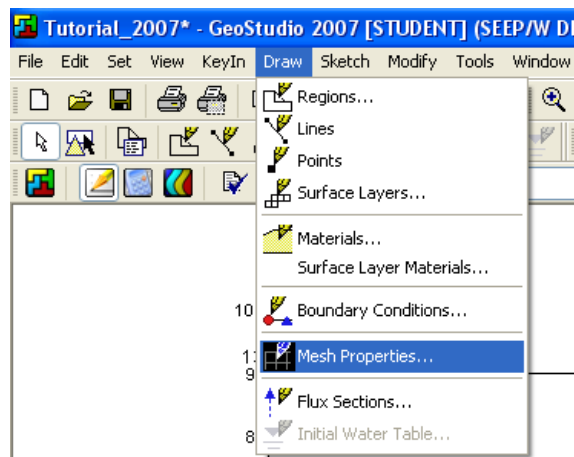


Como vemos en la figura anterior a la vez que hemos asignado las propiedades del suelo a las regiones, se ha generado la malla del modelo, en el siguiente punto

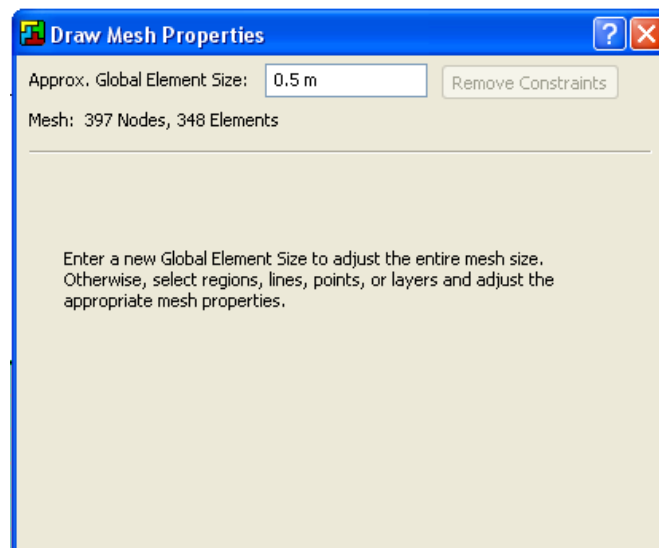
veremos como modificar las propiedades de la malla o generara mallas allí donde no las hemos generado.

## 2.15 Generación y modificación de la malla del modelo de elementos finitos.

Para proceder a la modificación o a la creación de la malla del modelo de elementos finitos procedemos a la elección de la opción **Mesh Properties** de la opción **Draw** del menú principal tal como se puede apreciar en la figura siguiente.

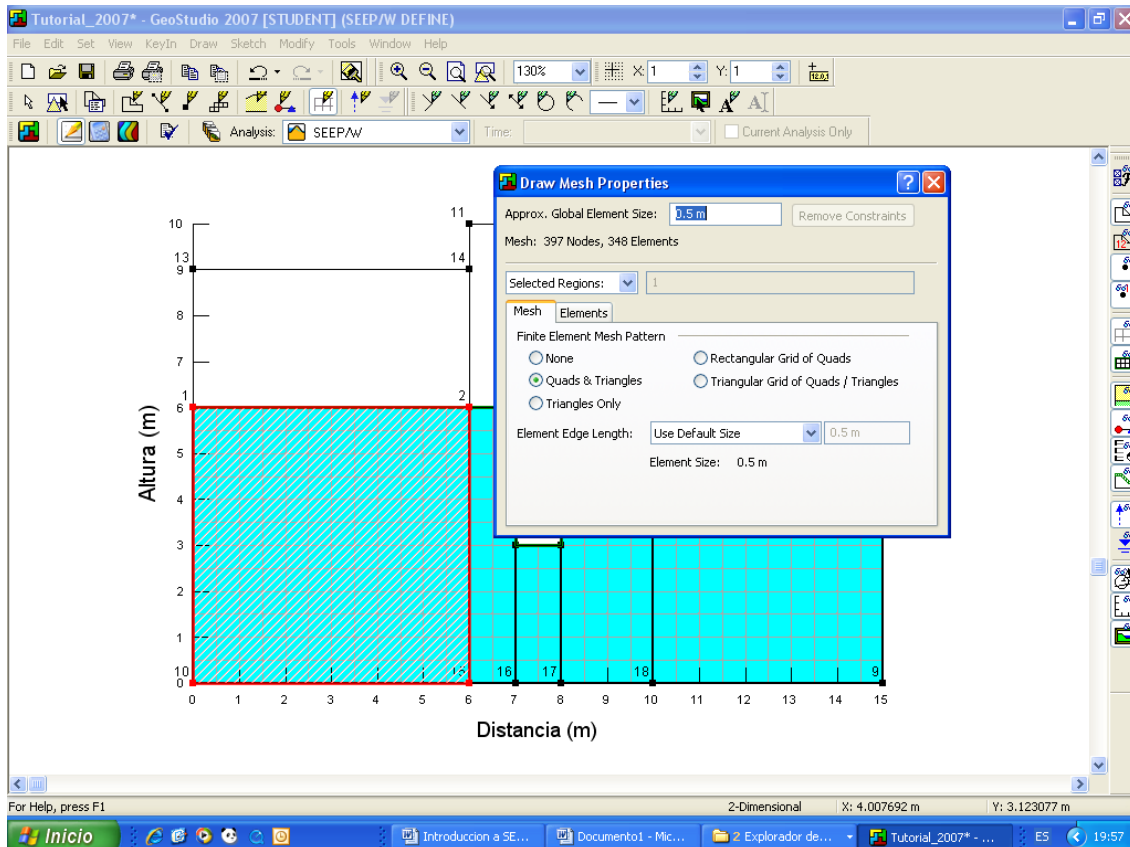


Una vez elegida la opción nos aparecerá la siguiente ventana

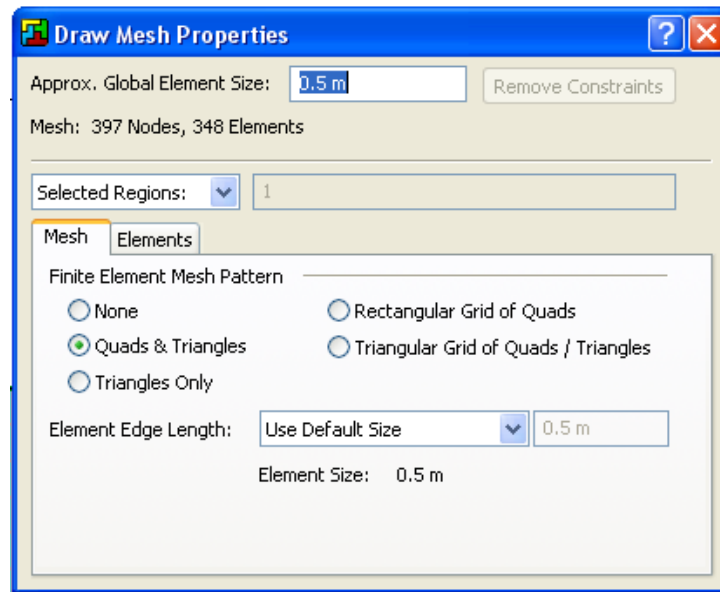


En la parte superior nos aparecerá una casilla con la etiqueta **Global Element Size**, aquí indicamos la separación entre los elementos de la malla de elementos finitos para el sistema de formado por las mallas de todas las regiones.

A continuación pulsamos sobre una de las regiones generadas, esta se nos remarcará y aparecerá una nueva ventana con una serie de nuevas opciones para el ajuste de la malla .



Tal como se ha comentado al pinchar con el puntero del ratón una de las regiones, esta se remarca y aparece la siguiente ventana:



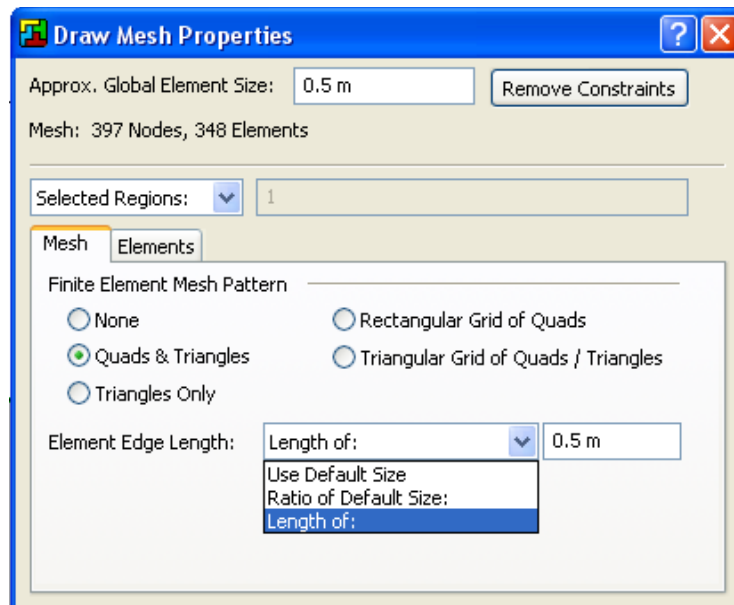
La opción **Global Element Size** es la misma que hemos visto anteriormente

En la pestaña **Mesh** nos encontramos con definiciones geométricas de la malla que vamos a definir o a modificar, para nuestro caso elegimos la opción **Quads & Triangles** (cuadrados y triángulos), existen otras opciones :

- Triangles Only (malla de triángulos)
- Rectangular Grid of Quads. (malla rectangular de cuadrados)
- Triangular Grid of Quads/Triangles, (malla triangular de Cuadrados o Triángulos).

Se recomienda al lector experimentar con estos modelos de mallas para elegir la que mejor se adapte al modelo a construir.

Como la versión del programa está limitada por el número de nudos a usar, elegiremos esta por defecto, ya se ajusta a un modelo aceptable.

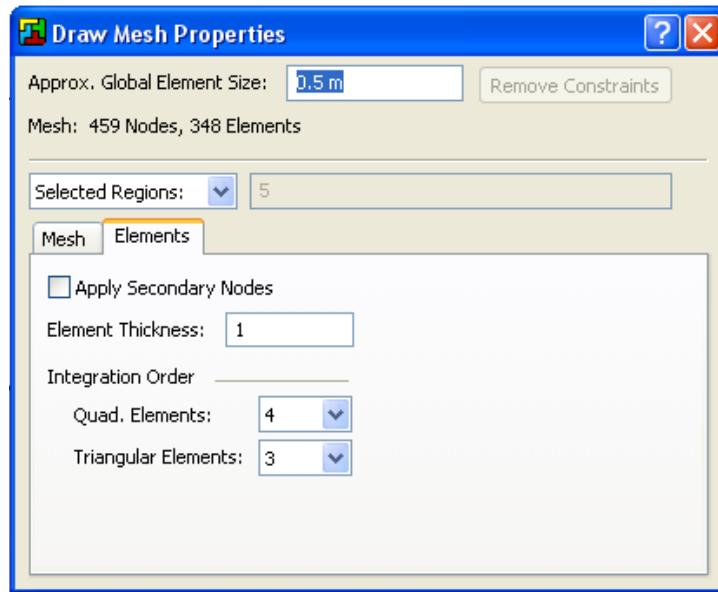


En la lista desplegable **Element Edge Length** podemos cambiar la separación de los elementos de la malla particularizándola para la malla de la región en la que estamos trabajando.

Hay tres opciones:

- **Use Default Size** (opción por defecto de la casilla Global Element Size)
- **Ratio of Default Size** (multiplica por el valor asignado el que tengamos en la casilla de Global Element Size).
- **Length of:** podemos introducir el valor que más nos interesa para el caso particular de la malla en la que estemos trabajando.

En al otra pestaña **Elements** aparecen las siguientes opciones:



Estas opciones nos sirven para actuar sobre el elemento que define el modelo, dejamos las opciones que aparecen en la figura de arriba.

Una vez que tengamos modificadas las propiedades de la malla pinchamos con el puntero del ratón sobre la región sobre la que estamos trabajando.

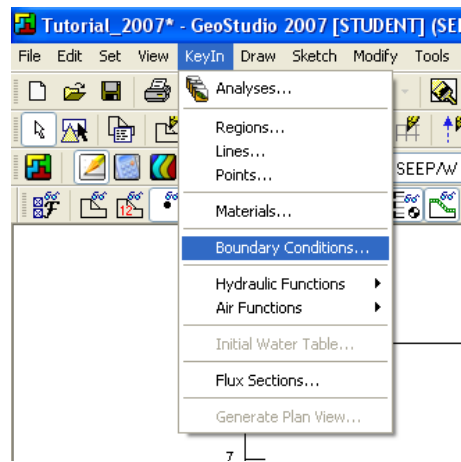
Si después pinchamos sobre otra región nos aparecerán las propiedades de esta nueva región para si es preciso modificarlas.

Para salir de la opción pulsamos el aspa general de cerrar ventanas de Windows.

## 2.16 Tipificación de las condiciones de contorno.

Para la definición de los tipos de condiciones de contorno una vez las tengamos definidas en nuestro boceto se van a poder implementar de la siguiente forma:

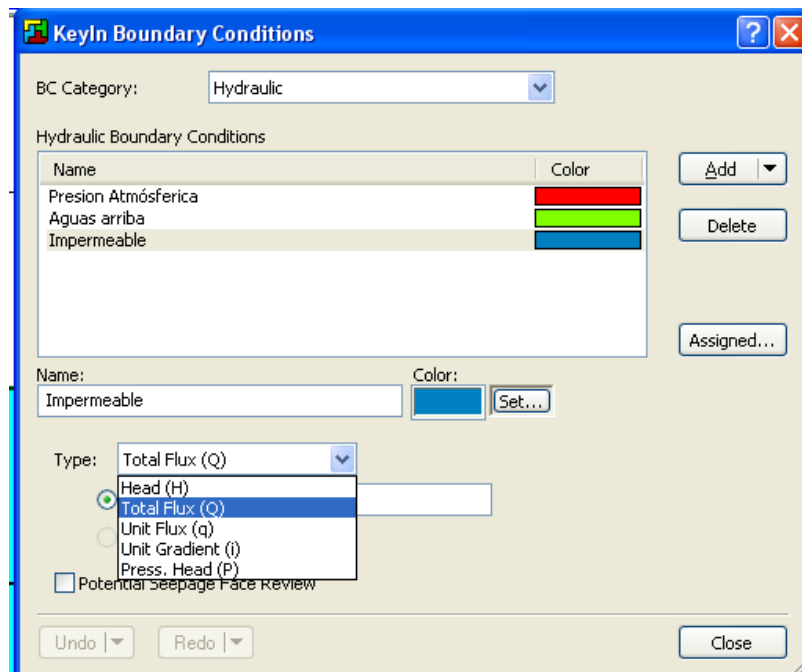
En el menú principal en **KeyIn** en la opción **Boundary Conditions** tal como se ve en la figura adjunta.



Nos aparecerá el siguiente cuadro de diálogo donde definiremos las siguientes condiciones:

- Contorno impermeable con denominación **Contorno Impermeable**
- Zona aguas arriba, sometida a altura piezométrica o presión de agua, denominada **Aguas Arriba**
- Zona aguas abajo sometida a otra altura piezométrica o presión de agua distinta, denominada **Aguas Abajo**.

Las opciones del cuadro de diálogo asociado a esta opción son:



- **BC Category** elegimos Hydraulic

- **Add** y **Delete** tienen las funciones de introducción y eliminación de condiciones de contorno.
- En las casilla **Name** introducimos la denominación de la condición de contorno que queremos definir y en **Color** indicamos con que color queremos identificar la condición de contorno que estamos implementando.

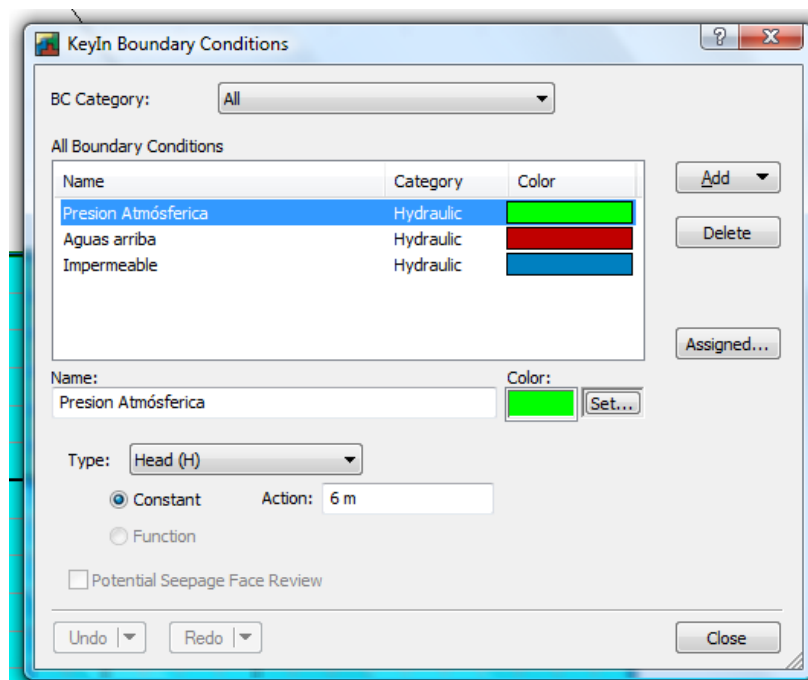
En **Type** definimos el tipo de dato que va a definir la condición de contorno, las más usuales son:

- **Head (H)** o lo que es lo mismo altura piezométrica  $H=z+u/\gamma_w$  siendo **z** la cota geométrica y  $u/\gamma_w$  la cota correspondiente a la presión del agua, depende del plano de referencia que tomemos (el factor de la cota geométrica)
- **Total Flux (Q)** caudal total que atraviesa una sección, lo podemos usar por ejemplo para definir una zona impermeable, caso de  $Q=0$  no hay flujo.
- **Press Head (P)**, es la componente  $u/\gamma_w$  de la expresión de la altura piezométrica, solo tiene en cuenta este factor, por lo tanto no hay que tener en cuenta el plano que tomemos como referencia

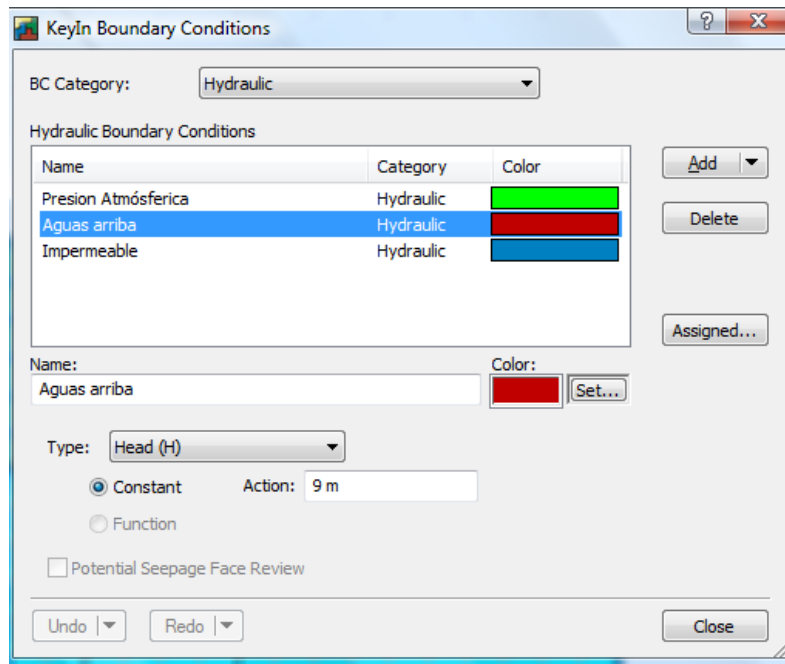
A continuación definimos las condiciones de contorno que vamos a usar para definir el modelo.

## 2.17 Valoración de las condiciones de contorno.

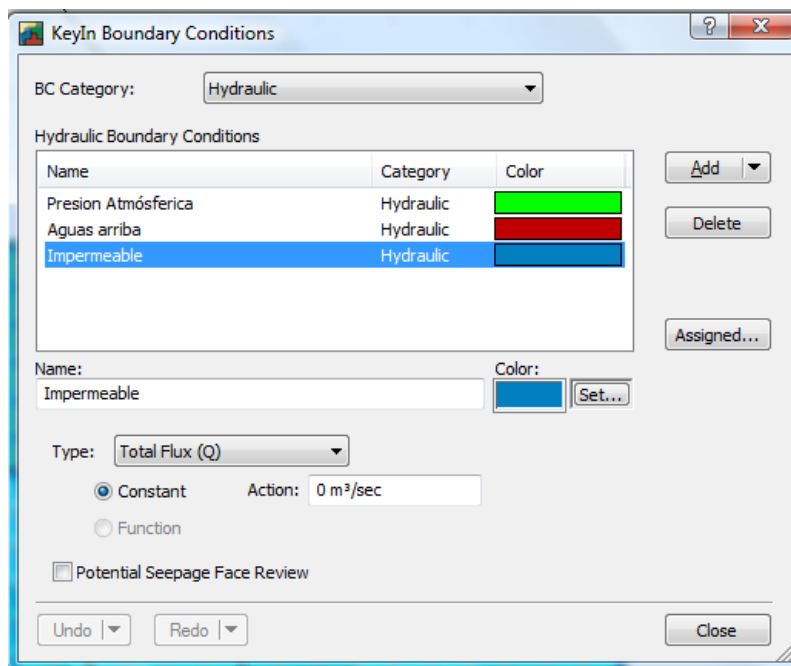
Para el caso de la condición Presión Atmosférica:



Para el caso agua arriba:



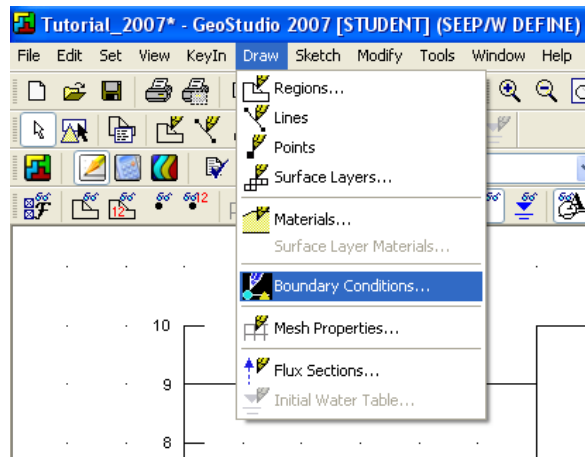
Para el caso Impermeable:



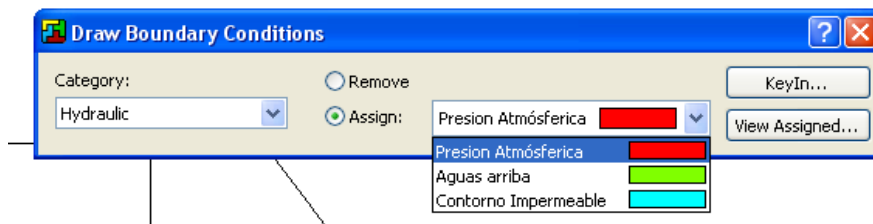
## 2.18 Aplicación de las condiciones de contorno.

Una vez definidos los tipos de contornos que aparecen en el problema que vamos a estudiar, vamos a proceder a indicar a nuestro modelo en que zonas se dan unas condiciones de contorno determinadas.

En el menú principal en **Draw**, seleccionamos la opción **Boundary Condition**, tal como vemos en la figura de abajo.



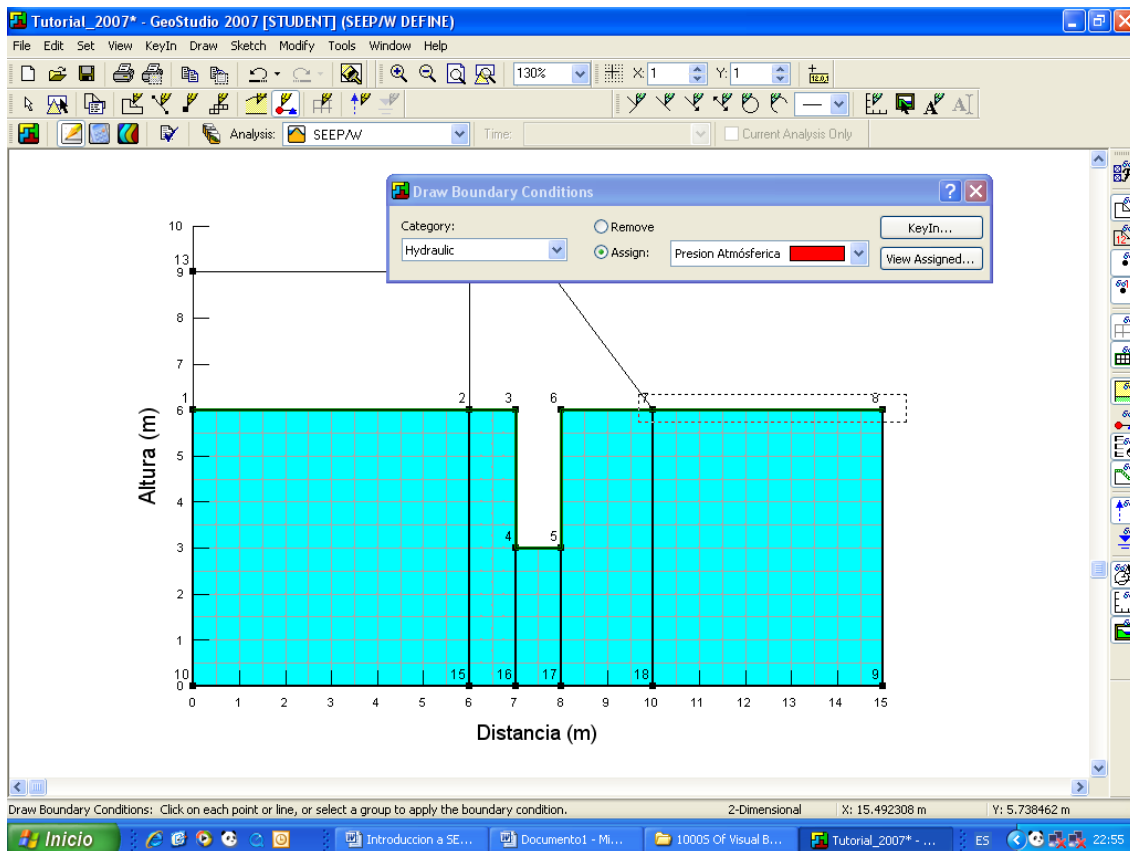
Seleccionada la opción nos aparecerá la siguiente ventana:



En ella vemos varias opciones:

- **Category** seleccionamos la opción Hydraulic.
- A la izquierda tenemos dos opciones, **Remove** que usaremos para borrar condiciones de contorno, la otra opción es **Assign** la activamos para asignar la condición de contorno que tengamos seleccionada en la lista desplegable que hay junto a la opción Assign.

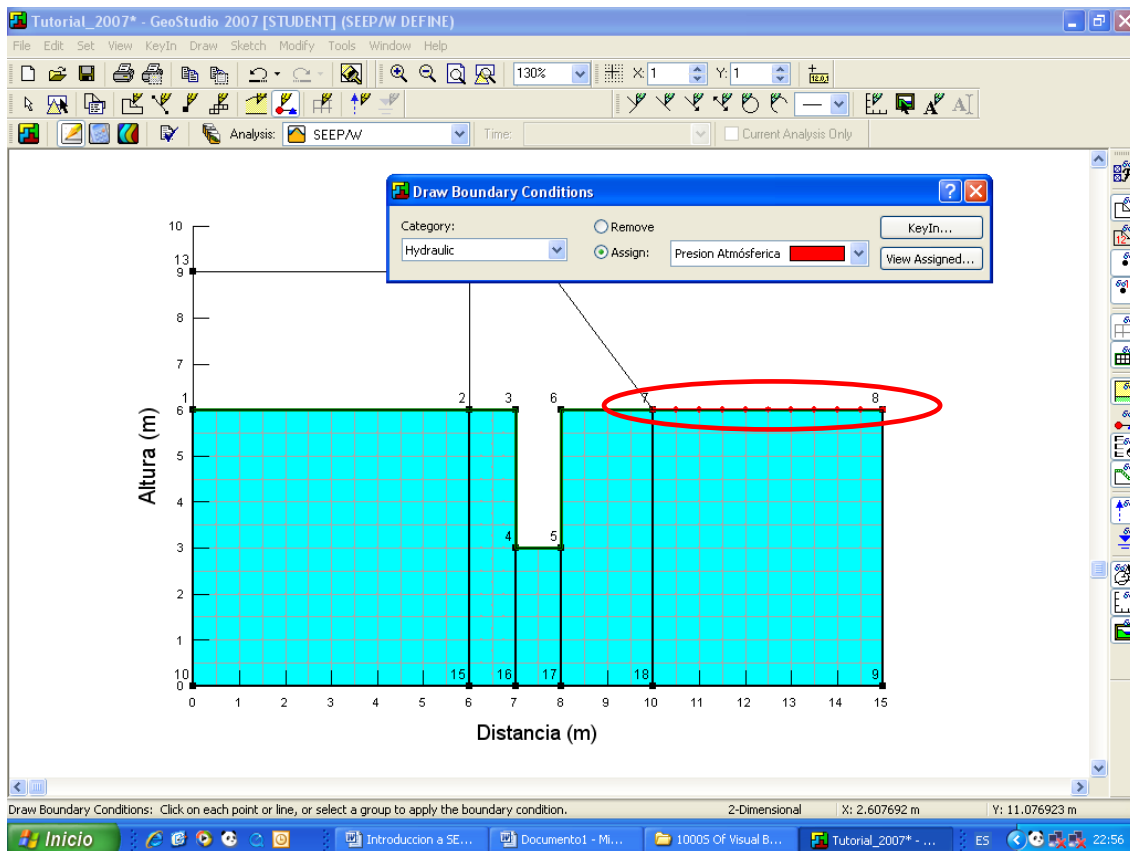
Para asignar la condición de contorno a un dominio en concreto marcamos con el ratón pulsando el botón derecho, sin soltar y envolviendo la zona a la que queremos asignar la condición de contorno desde el primer punto al último dejándolos dentro de la selección tal como se ve en la siguiente figura:



Tal como se ha comentado anteriormente hay que dejar dentro de la selección todos los puntos de la zona a la que se le quiere asignar la condición de contorno.

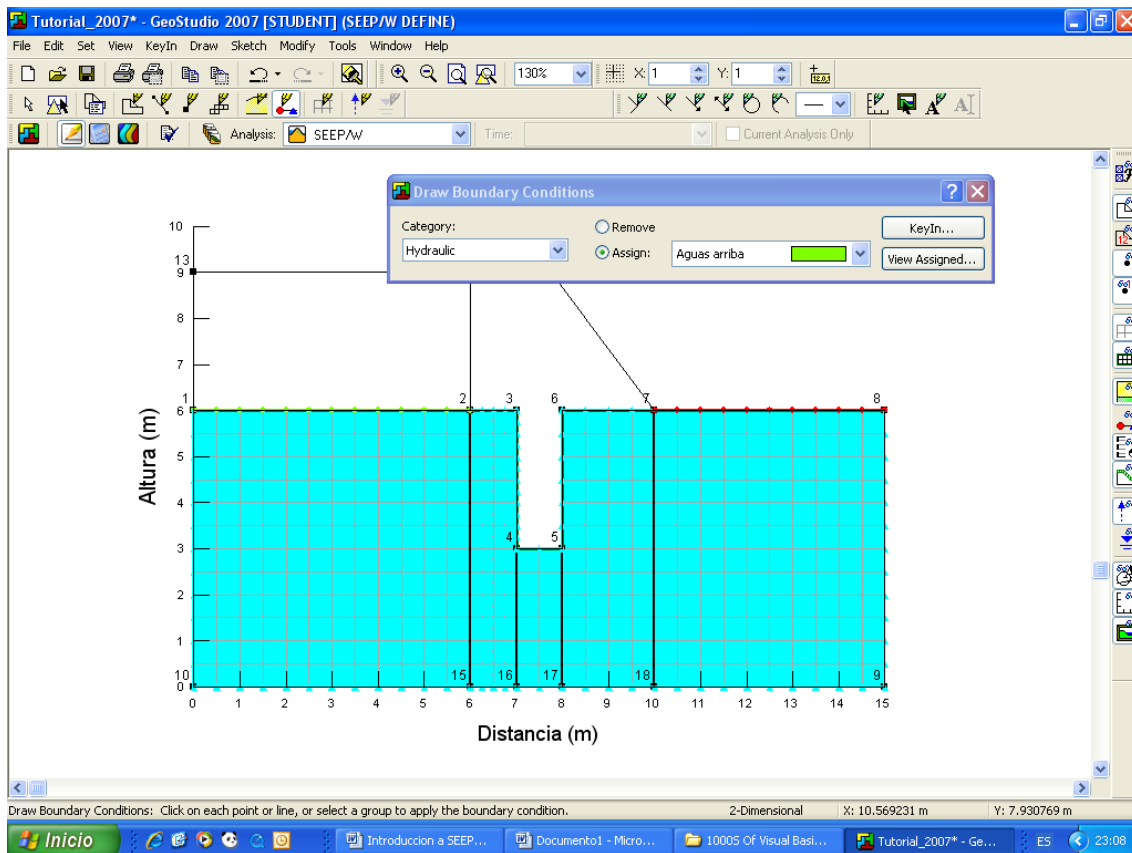
También se puede hacer click en una zona delimitada por dos puntos del contorno y la asignación se realizará automáticamente, de ahí la sugerencia de delimitar regiones en función de las condiciones de contorno ya que su asignación y manipulación es más sencilla.

Una vez aplicada nos quedará tal como se puede apreciar en la figura siguiente.



Aplicando la restantes condiciones de contorno al resto de los límites de las regiones nos quedaría tal como se indica en la figura adjunta.

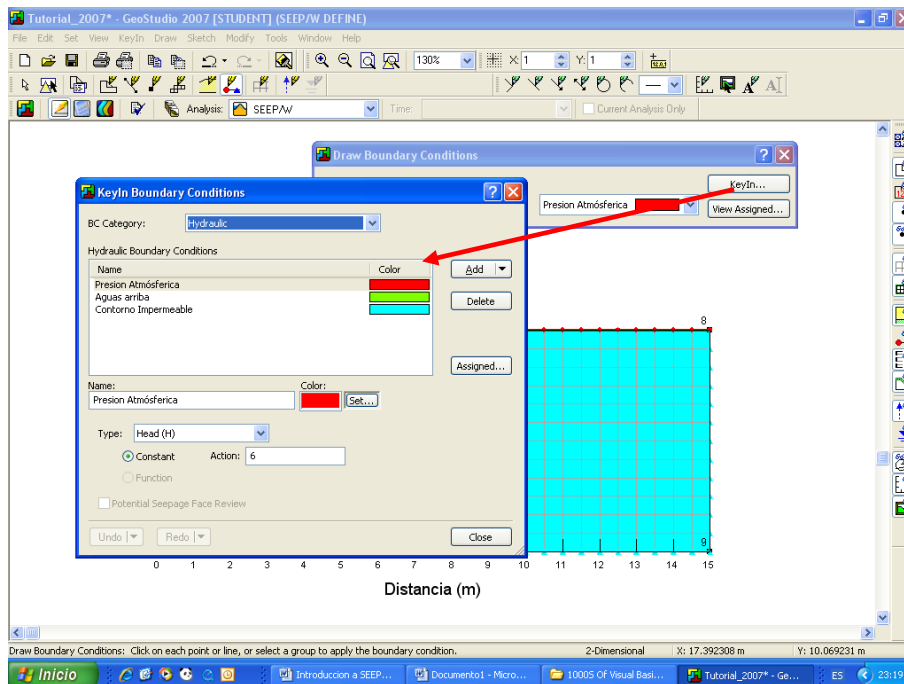
Para la selección de la otras condiciones, lo hacemos a través de la lista desplegable, que antes se ha comentado.



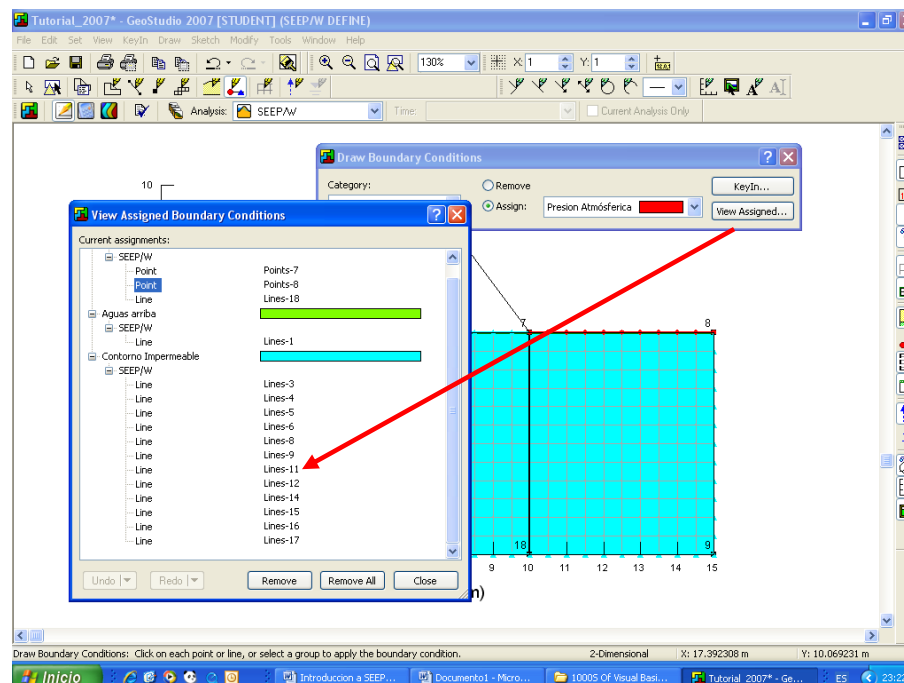
El programa entiende automáticamente que los contornos a los que no se les aplique condiciones de contorno son impermeables, pero se le sugiere el lector su aplicación ya que así se tiene una mejor percepción de la definición del modelo.

Existen dos botones con dos opciones interesantes:

- **KeyIn**, con la que podemos cambiar las propiedades de los contornos, tanto en definición como en color etc..



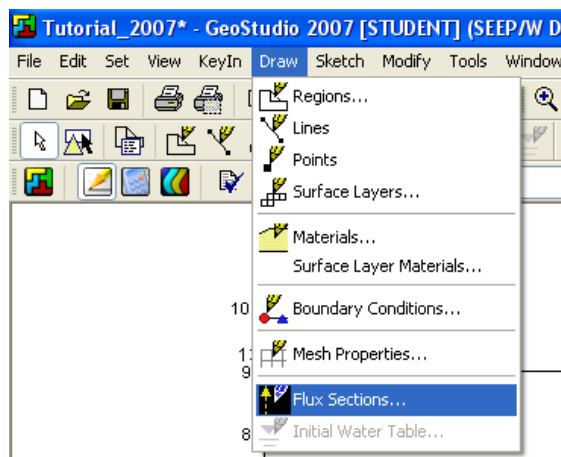
- El otro botón es **View Assigned..** en esta opción podemos visualizar en que dominios se han aplicado las condiciones de contorno, nos permite borrar una en concreto o todas a la vez.



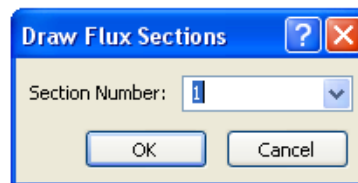
## 2.19 Colocación de secciones de control de flujo.

Con objeto de conocer el caudal que atraviesa una determinada sección de nuestro modelo, para comprobar la eficacia de las medidas que se toman para minimizar fugas o para el dimensionamiento de un equipo de bombeo necesario, vamos a conocer que caudal atraviesa una determinada zona de nuestro modelo, para ello realizamos las siguientes tareas.

Seleccionamos **Flux Sections** dentro de la opción de menú **Draw** como se indica en la figura siguiente.

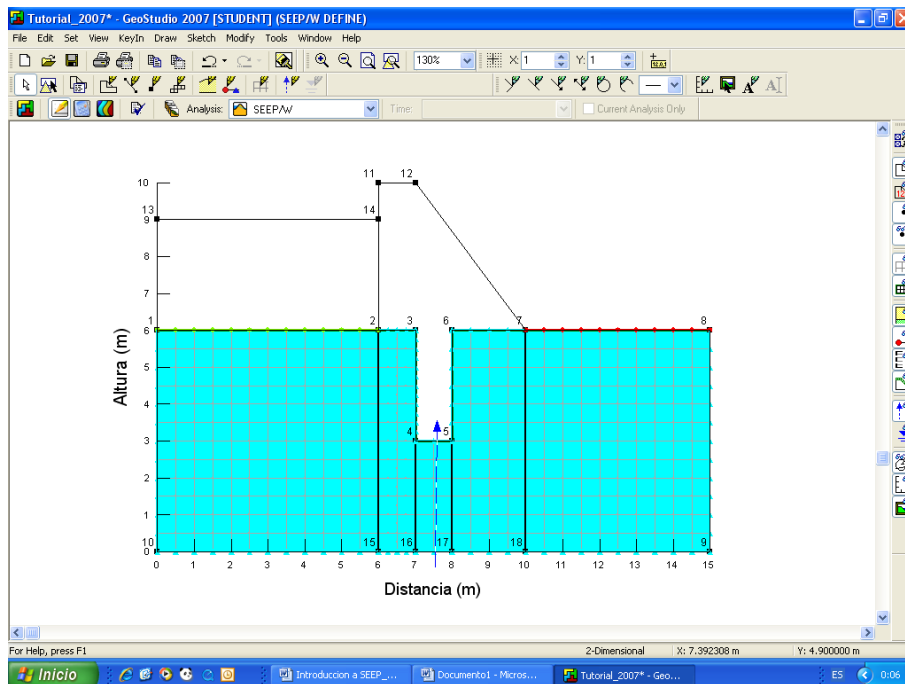


Nos saldrá la siguiente ventana



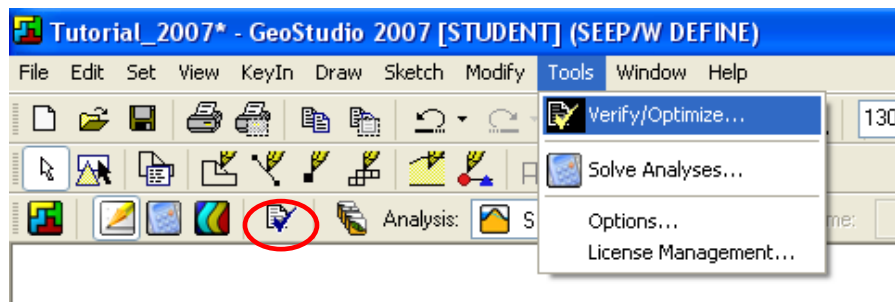
En la opción **Section Number** indicamos el número que le asignamos a nuestra sección de control de flujo, le podemos asignar varias secciones de control, cada una asociada a un número en este caso sólo vamos a usar una sección de control de flujo, tecleamos 1 y pulsamos **OK**

Pulsamos con el ratón en el punto inicial y final de la zona que queremos estudiar (un click cada uno), quedaría como se ve en la figura siguiente:

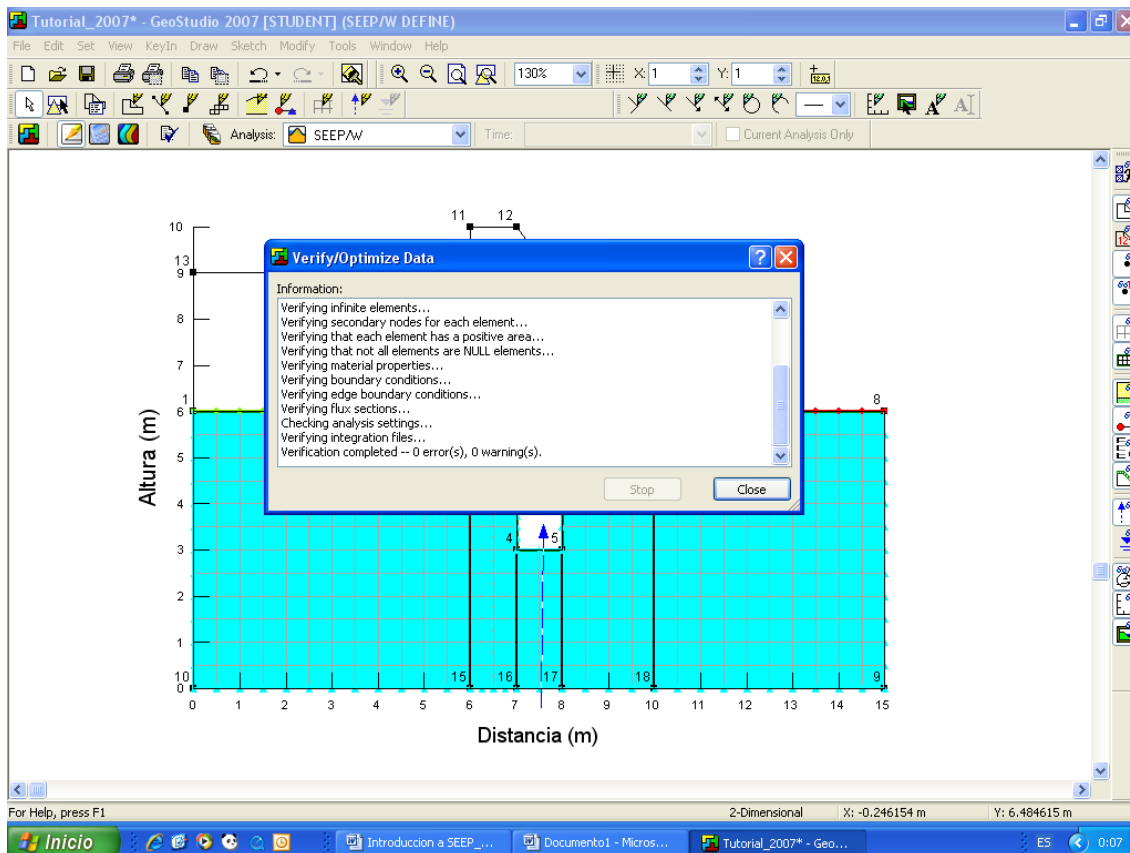


## 2.20 Verificar la existencia de errores

Una herramienta de la que dispone el programa que nos va a evitar la generación de errores, si introducimos mal la geometría, condiciones de contorno mal definidas, etc es la localizada en la opción de menú **Tools** pulsando en la opción **Verify/Optimize....**o si lo preferimos en el icono marcado con un círculo rojo de la figura siguiente.



Pulsando esta opción obtenemos la siguiente ventana, al activarse la ventana se pone en funcionamiento el rastro de errores.



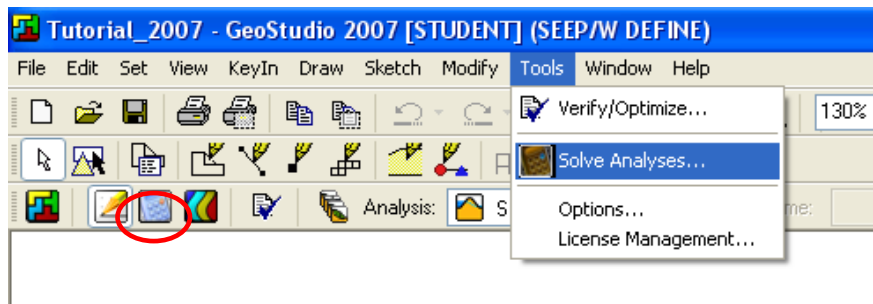
Si no hay errores, como en nuestro caso pulsamos **Close**, en caso contrario se nos avisará que elemento hay que corregir, realizaremos las acciones oportunas para corregir dichos errores y volveremos a rastrear de nuevo al geometría.

Ya estamos en condiciones de proceder al cálculo de la red de flujo del modelo que hemos generado, para ello seguimos los pasos que se indican a continuación.

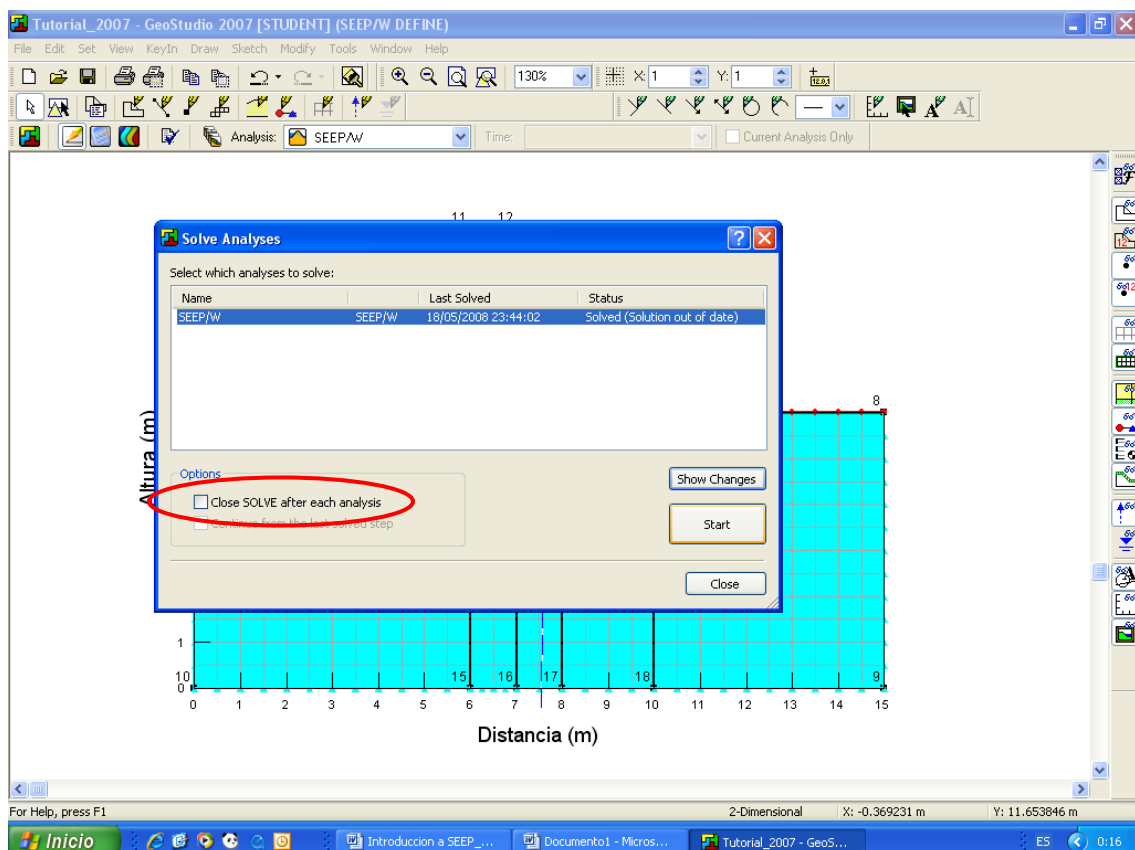
## 2.21 Resolver el problema

Para iniciar los cálculos que nos permitan visualizar los resultados asociados al modelo que hemos contruido procederemos de la siguiente forma:

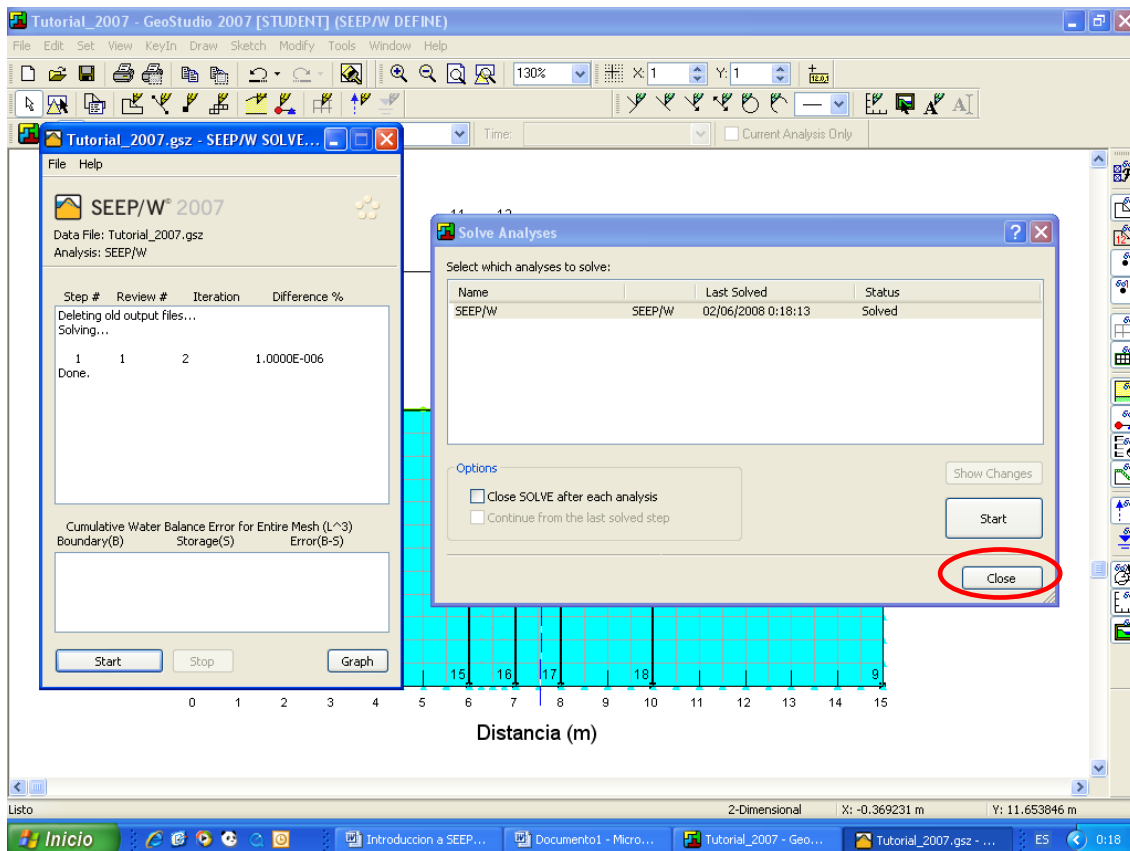
- Seleccionar del menú desplegable **Tools** elegimos la opción **Solve analyses...** o hacemos clic sobre la figura marcada en rojo, tal como se puede observa en la figura siguiente



Nos aparece el siguiente cuadro de diálogo sobre el que pulsamos el botón Start, no sin antes desactivar la opción **Close SOLVE alter each análisis** que cerraría las ventanas de cálculo una vez realizado este.



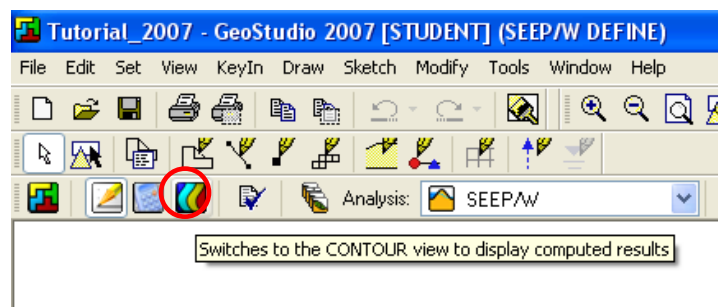
iniciándose en cálculo dando los siguientes resultados:



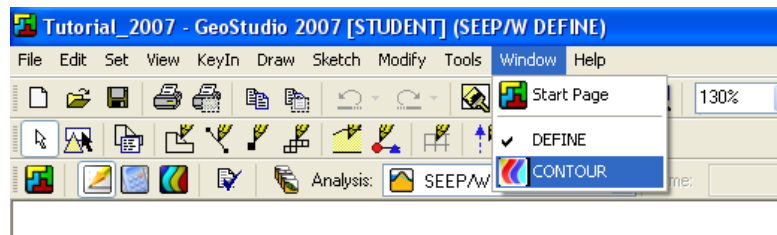
Una vez comprobamos los resultados pulsamos **Close**.

## 2.22 Ver resultados del cálculo

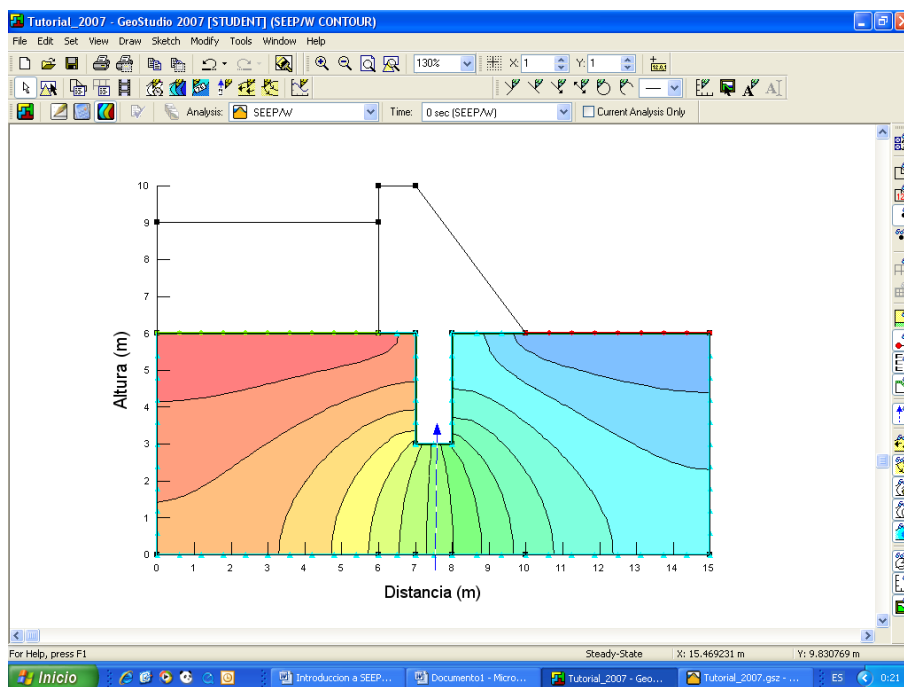
Una vez terminado el cálculo, con objeto de visualizar los resultados pulsamos sobre el icono marcado en rojo que se indica a continuación:



O pulsando **Contour** de la opción **Window** del menú principal



Una vez pulsada la opción se carga el programa **Contour** con el siguiente resultado:



En el que aparecen las líneas equipotenciales resultado correspondientes al modelo que hemos definido.

A partir de ahora vamos a trabajar con el programa **Contour**, la introducción de los datos previos y los cálculos que hemos realizado han sido llevados a cabo mediante el programa **Define**, al que volveremos posteriormente para realizar cambios o ajustes en los datos iniciales.

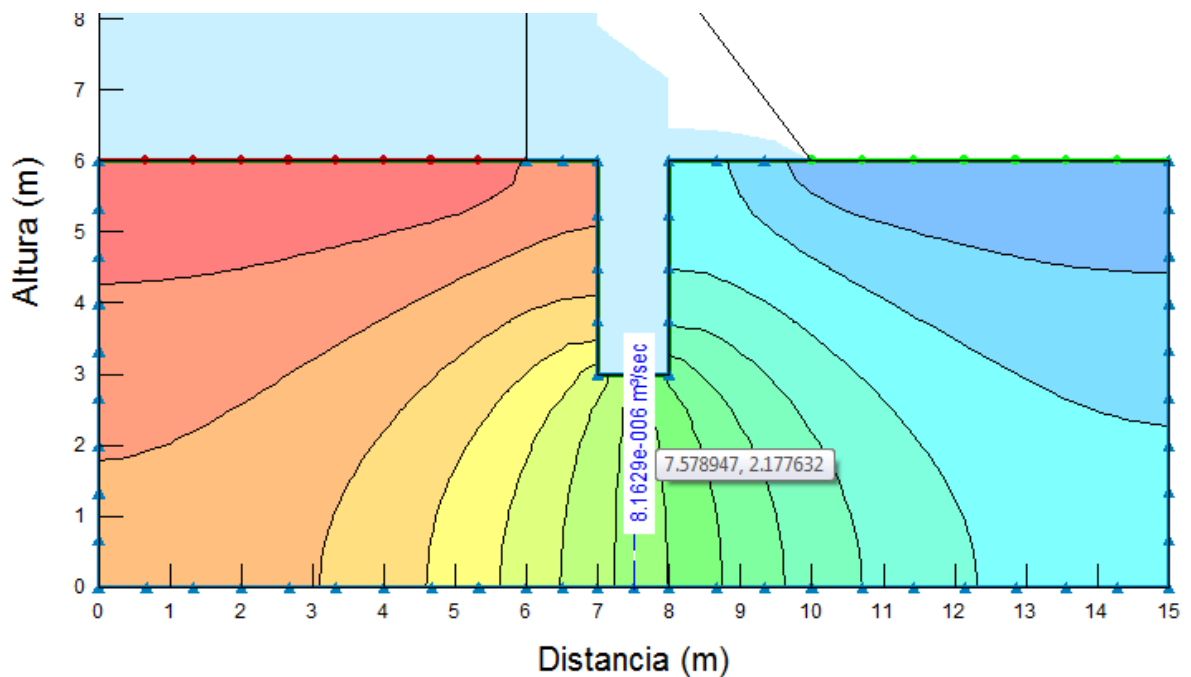
## 2.23 Cálculo del caudal infiltrado

Para obtener el caudal infiltrado en la sección marcada, una vez activada la opción Contour, procedemos de la siguiente forma:

En el menú Draw seleccionamos Flux labels, es decir vamos a activar la opción de etiquetas de flujo de una sección que colocásemos previamente, tal como se ve en la figura siguiente:



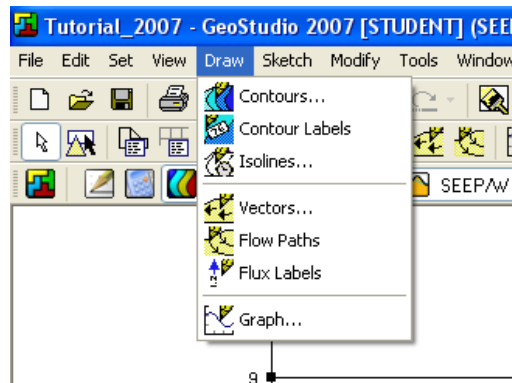
Tras pulsar la opción el cursor toma forma de cruz que llevaremos sobre la sección pulsando sobre ella, entonces aparecerá la etiqueta del caudal por metro de sección transversal.



## 2.24 Dibujo de contornos

En este apartado vamos a sacar provecho de una de las opciones más útiles del programa **Contour** y es a través del uso de la opción de menú **Draw**

Al hacer clic sobre esta opción de menú nos aparece el siguiente despliegue de opciones.



Observamos las siguientes opciones:

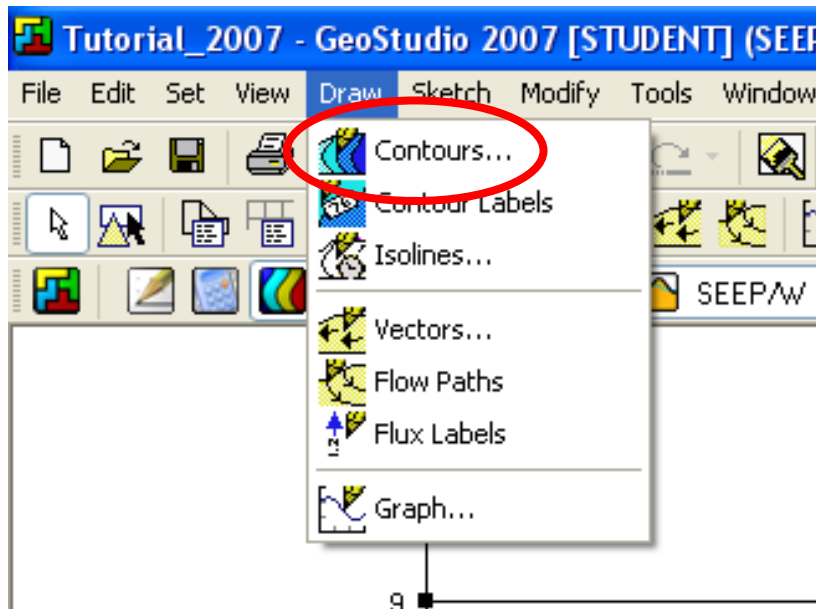
- Contours
- Contour Labels
- Isolines
- Vectors
- Flow Path
- Graph.

Con estas opciones podremos visualizar líneas piezométricas, líneas de flujo, presiones intersticiales etc.

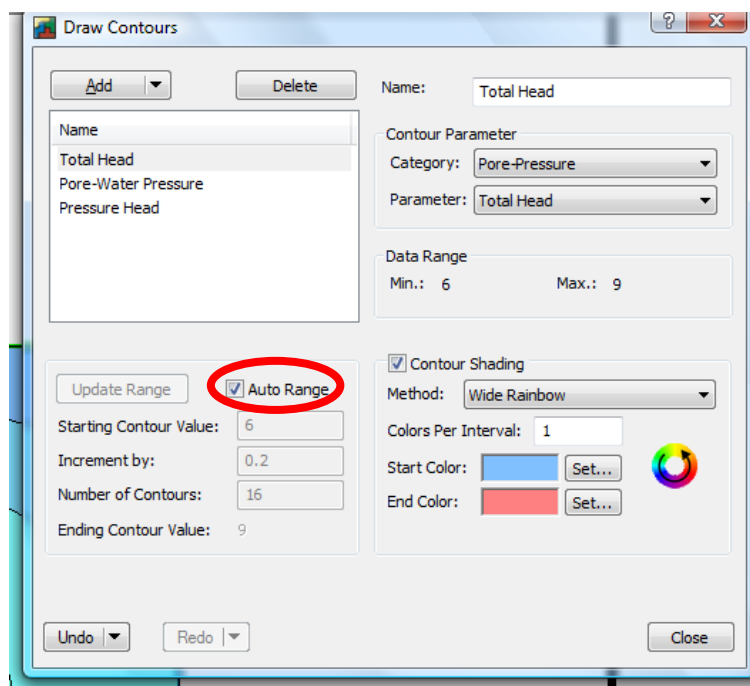
## 2.25 Modificación de los contornos

Una vez obtenidas el campo de líneas piezométricas del punto 2.10, es posible modificar el número de líneas piezométricas, de tubos, colores etc.

Para ello en el menú *Draw* seleccionamos *Contours* tal como se ve en la siguiente figura:



Nos aparecerá el siguiente cuadro de diálogo:

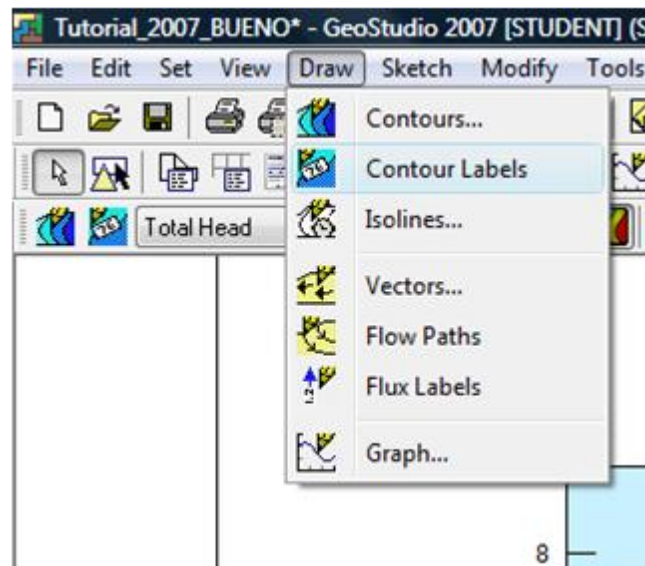


Existen varias opciones con las que podemos manipular la presentación de los contornos, número de caídas, etc, para simplificar activamos la opción *Auto Range*, la que está rodeada de rojo, después pulsamos *Close*.

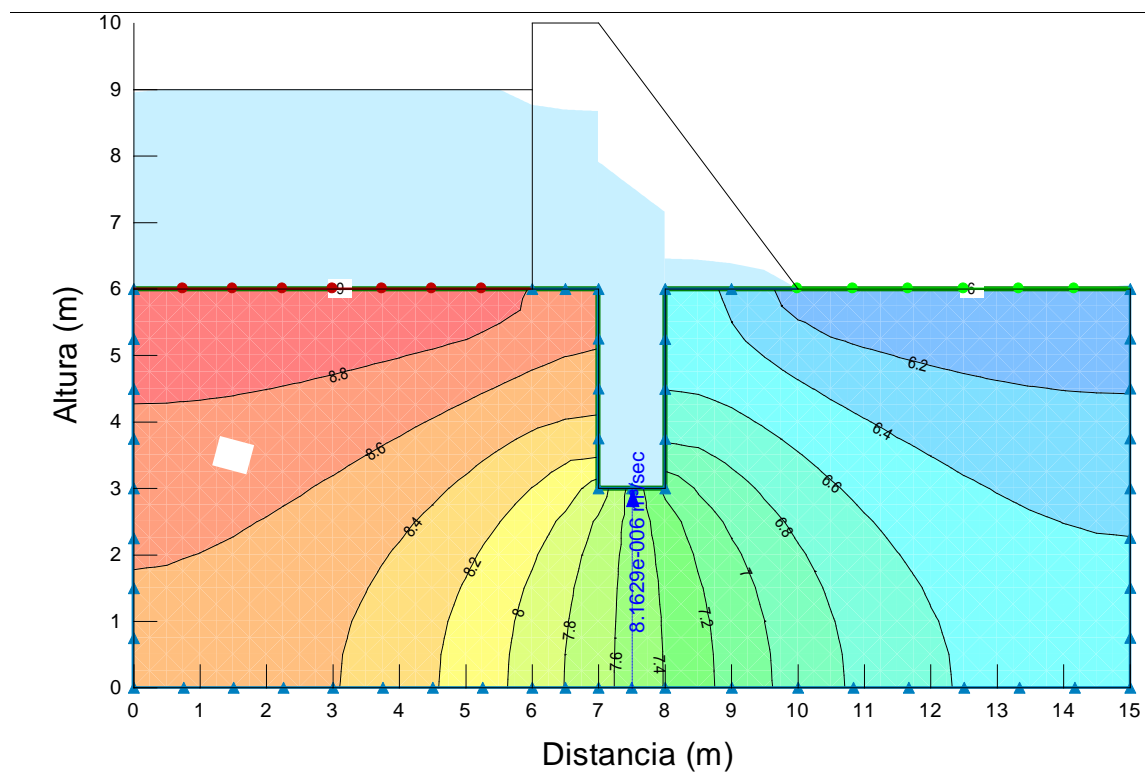
## 2.26 Etiquetas en los contornos

Una vez obtenidas el campo de líneas piezométricas podemos colocar etiquetas que nos indique los sus valores asociados, el procedimiento es el siguiente.

En el menú Draw, seleccionamos la opción Contours Labels, como se puede apreciar en la siguiente figura:



El cursor se transformará en una cruz y con el pinchamos en cada uno de los contornos. Quedando la figura tal como se puede apreciar en la siguiente figura:



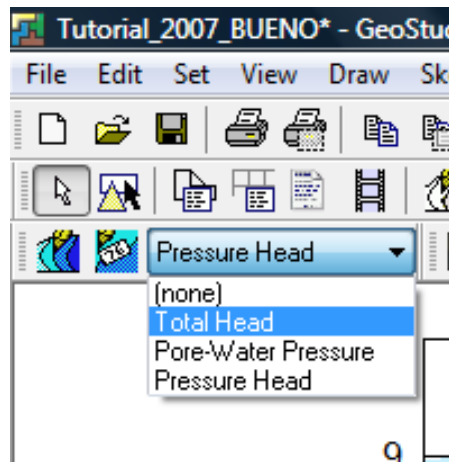
Cada línea piezométrica ha quedado etiquetada, esta opción sirva tanto para colocar etiquetas como para eliminarlas.

## 2.27 Representación de Presiones de poro y presiones de altura piezométrica

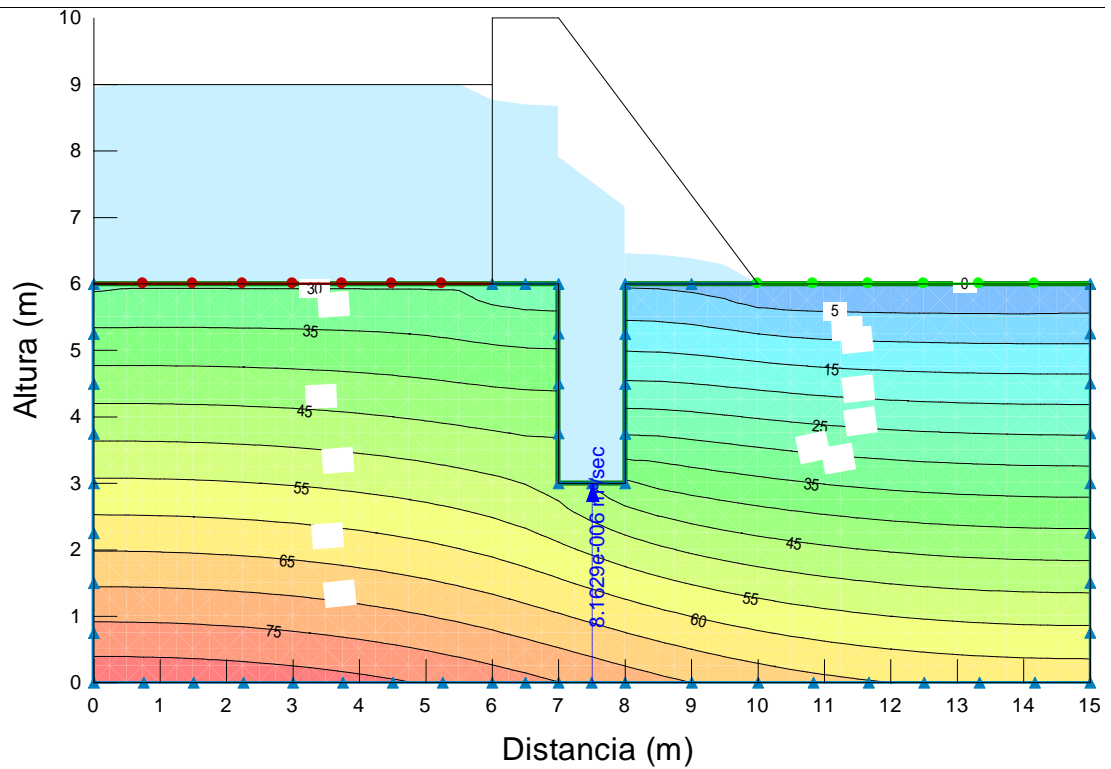
Aparte de las líneas piezométricas se pueden obtener más representaciones gráficas, en esta versión del programa se pueden visualizar:

- Presiones de Poro.
- Presiones de altura piezométrica.

Para activar las distintas opciones se usa una lista desplegable situada debajo del menú de opciones, tal como se ve en la siguiente figura.



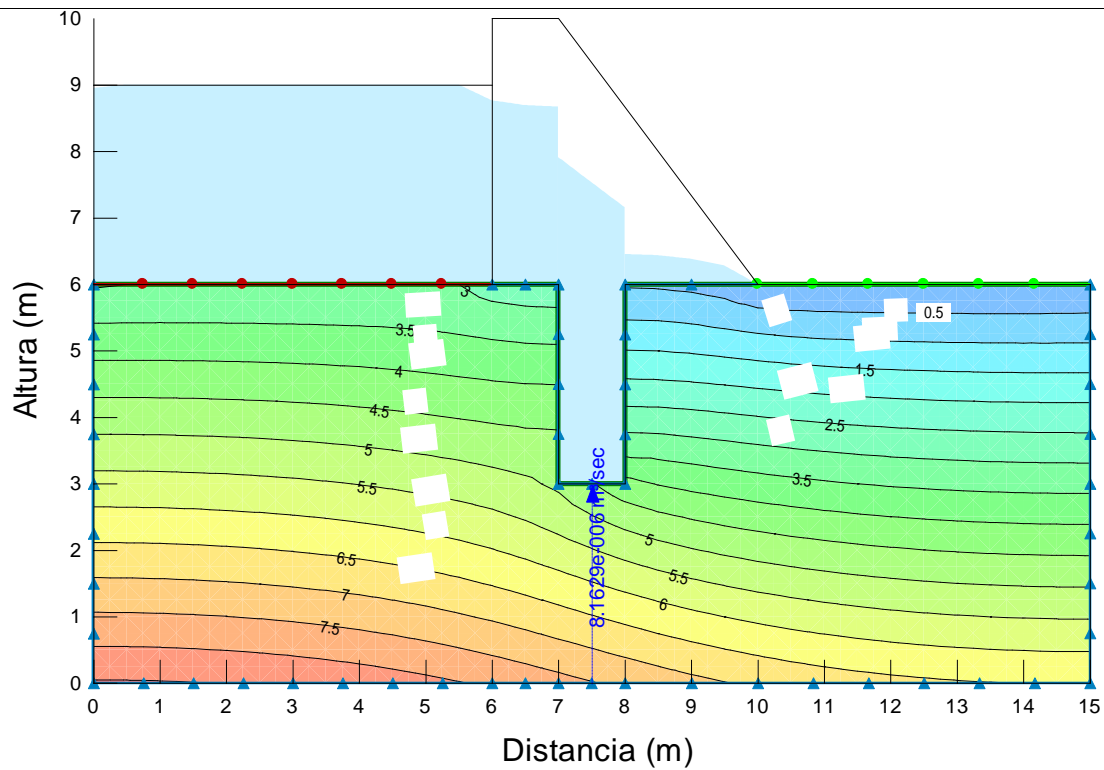
Para el caso de Pore-Water Pressure, nos daría la siguiente presentación



Y para la opción Pressure Head nos daría la siguiente pantalla

Para

usanis



Para la colocación de las etiquetas de los valores usamos la opción Contours Labels explicada en párrafos anteriores.

La primera edición de este manual se terminó en Córdoba el día 14 de Noviembre de 2010 a las 22:51.

Las próximas ediciones espero estén más depuradas y contengan indicaciones de los lectores y alumnos/as de la asignatura.