

CI66J

## CI 66J/CI 71T MODELACION DE AGUAS SUBTERRANEAS

INTRODUCCION A VISUAL MODFLOW



CI66J

- **INTRODUCCION**
- **VISUAL MODFLOW**
  - GENERAL
  - MALLA
  - PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS
  - ACCIONES EXTERNAS
  - CONDICIONES DE BORDE
  - CONDICIONES INICIALES
  - OPERACION
- **FORTALEZAS/DEBILIDADES**



CI66J

## INTRODUCCION

El modelo utilizado en este curso, Visual MODFLOW, es una herramienta computacional muy útil y fácil de operar, por sus características visuales y de manejo de datos.

Como descripción general de este modelo se puede mencionar que es capaz de abordar simulaciones del flujo de aguas subterráneas en tres dimensiones, las cuales en conjunto con una serie de paquetes que posee el programa (M3TD y RT3D) permiten abordar problemas de transporte de contaminantes.

Presenta ventajas en la representación gráfica de los sistemas a modelar, facilitando la entrada de datos para definir el escenario de simulación.



CI66J

## INTRODUCCION

Como con todo modelo numérico el objetivo de la modelación de un sistema hídrico subterráneo con Visual MODFLOW es la obtención de los siguientes resultados:

- evolución de los niveles de agua subterránea
- velocidades de flujo en el entorno definido como zona de interés.

Es uno de los modelos más utilizados y reconocidos internacionalmente en el área de la hidrogeología para la simulación de flujo.



CI66J

- **INTRODUCCION**
- **VISUAL MODFLOW**
  - **GENERAL**
  - MALLA
  - PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS
  - ACCIONES EXTERNAS
  - CONDICIONES DE BORDE
  - CONDICIONES INICIALES
  - OPERACION
- **FORTALEZAS/DEBILIDADES**



CI66J

## VISUAL MODFLOW

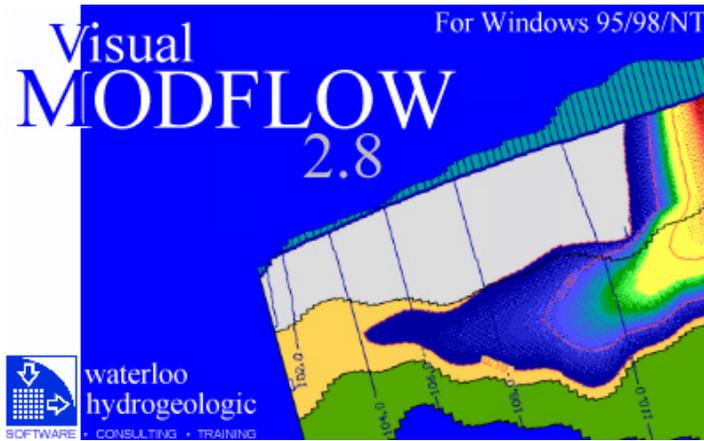
Un modelo capaz de resolver el problema de flujo de aguas subterráneas en tres dimensiones es MODFLOW, el cual fue desarrollado por McDonald y Harbaugh pertenecientes al U.S. Geological Survey (1988).

Visual MODFLOW es un producto comercial, desarrollado por Waterloo Hydrogeologic Inc., que permite resolver problemas de flujo en tres dimensiones. El programa permite una interacción con el usuario muy amigable, mediante un sistema gráfico con diversas ventanas, en donde el usuario puede ingresar gran parte de la información visualmente, asignando dentro del mismo modelo las propiedades del sistema que se requiere simular.

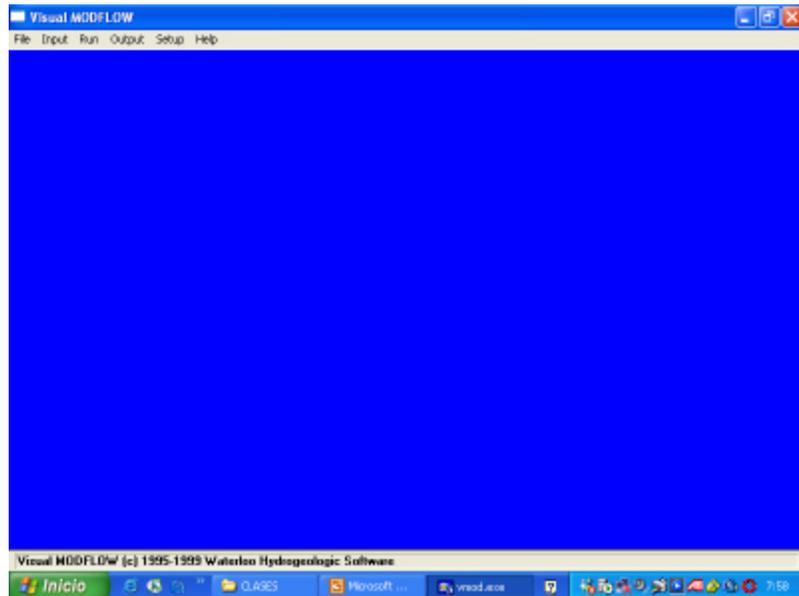
GENERAL



CI66J



CI66J



CI66J

- INTRODUCCION
- VISUAL MODFLOW
  - GENERAL
  - **MALLA**
  - PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS
  - ACCIONES EXTERNAS
  - CONDICIONES DE BORDE
  - CONDICIONES INICIALES
  - OPERACION
- FORTALEZAS/DEBILIDADES



CI66J

## VISUAL MODFLOW

Para la creación de un nuevo modelo de simulación numérico Visual MODFLOW posee dos alternativas para iniciar una simulación:

### ALTERNATIVA 1

Importar un plano del sector a modelar preexistente, el cual debe ser un archivo \*.DXF, que corresponde a un formato del programa de dibujo AUTOCAD o \*.BMP (Imagen), y luego definir dentro del modelo el número de columnas, filas y capas del sistema, especificando cota mínima ( $Z_{\min}$ ) y cota máxima ( $Z_{\max}$ ).



[CREACION DE MALLA](#)

CI66J

## VISUAL MODFLOW

Para la creación de un nuevo modelo de simulación numérico Visual MODFLOW posee dos alternativas para iniciar una simulación:

### ALTERNATIVA 2

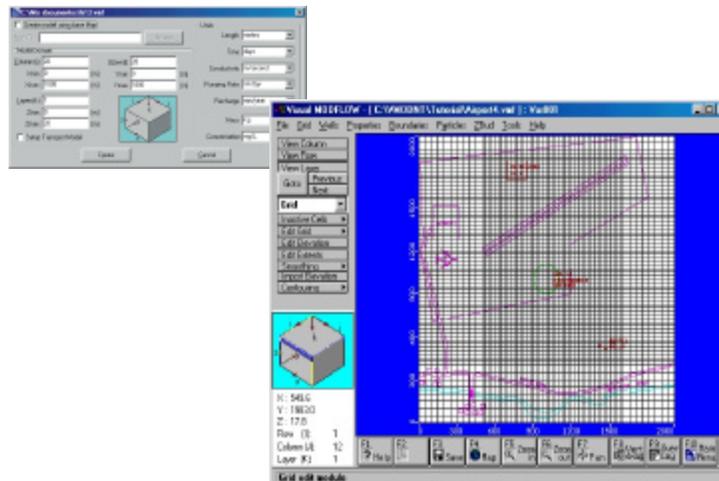
Definir dentro de Visual MODFLOW la geometría del sistema, indicando las dimensiones en planta de la zona y luego el número de columnas, filas y las capas. Esta opción presenta como desventaja que elementos tales como ríos, zonas de discontinuidad de las propiedades del acuífero y otros elementos, no son visualizados tan fácilmente como en la alternativa anterior, en donde éstas podían venir dibujadas en el mismo plano.



CREACION DE MALLA

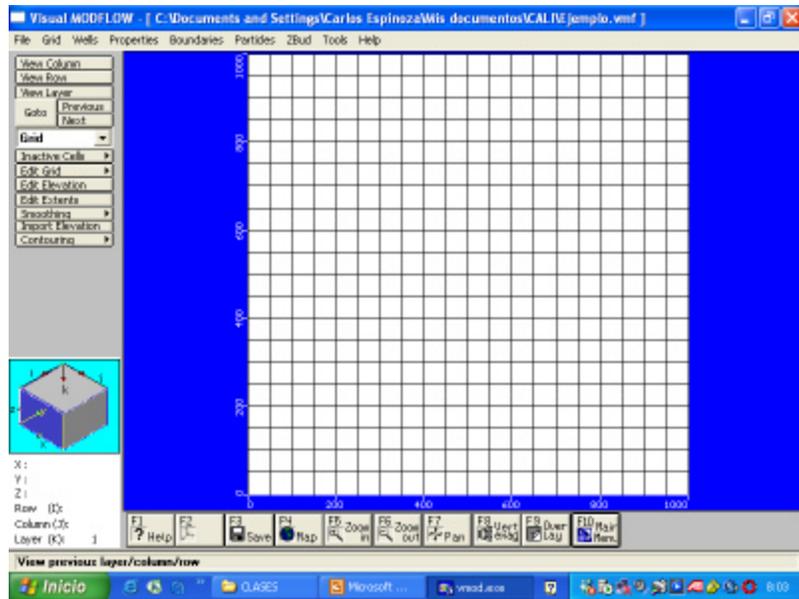
CI66J

## VISUAL MODFLOW



CREACION DE MALLA

CI66J



CI66J

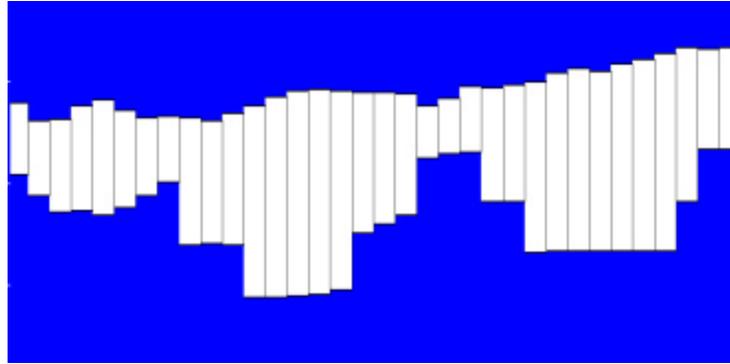
## Modelo Hidrogeológico Geometría del Acuífero



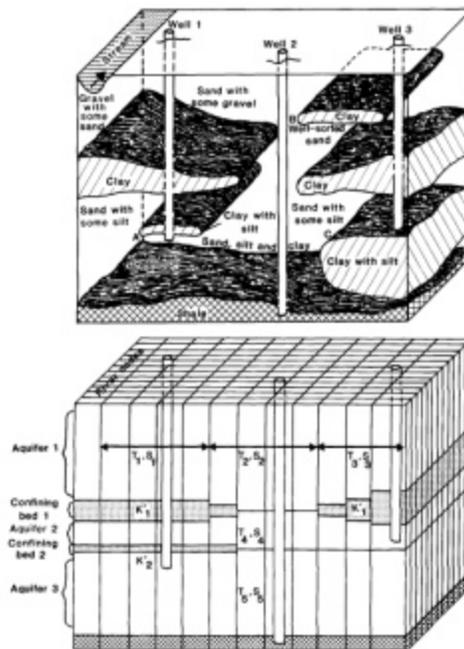
CI66J

# Modelo Hidrogeológico

## Geometría del Acuífero



CI66J



CI66J

- INTRODUCCION
- VISUAL MODFLOW
  - GENERAL
  - MALLA
  - **PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS**
  - ACCIONES EXTERNAS
  - CONDICIONES DE BORDE
  - CONDICIONES INICIALES
  - OPERACION
- FORTALEZAS/DEBILIDADES



CI66J

## VISUAL MODFLOW

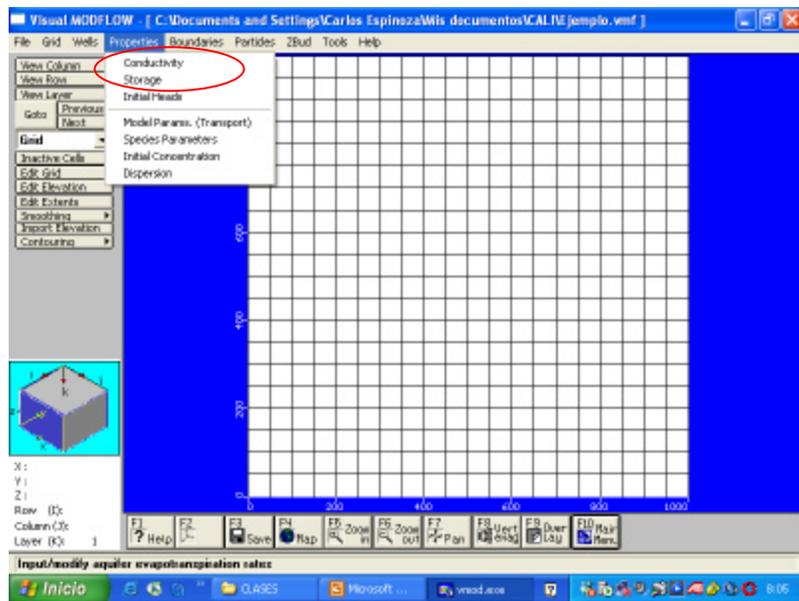
Las propiedades físicas a describir son la conductividad hidráulica ( $K$ ) y el coeficiente de almacenamiento ( $S$ ) en cada acuífero, y la conductancia hidráulica vertical ( $K_i'/b_i'$ ) entre distintos acuíferos.

- Conductividad Hidráulica ( $K$ )
- Almacenamiento Específico ( $S_s$ )
- Capacidad Específica ( $S_y$ )
- Porosidad Total
- Porosidad Efectiva (Eff.Por)

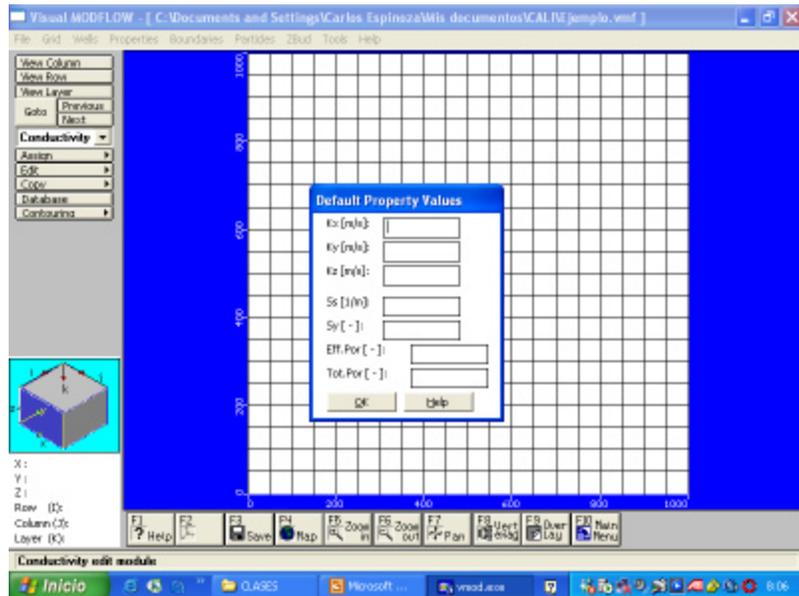


PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS

CI66J

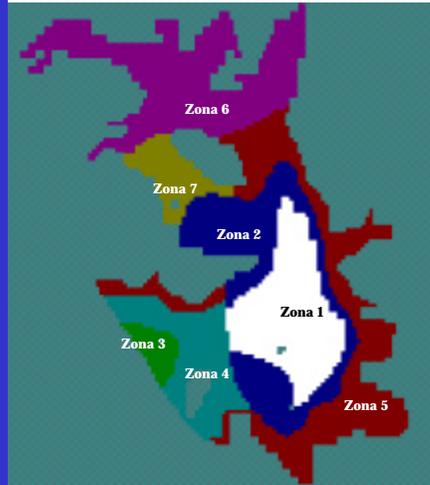


CI66J



CI66J

## Modelo Hidrogeológico Resultados de la Calibración



Zona	$k_x$ (m/s)	$k_y$ (m/s)	$k_z$ (m/s)
1	0.000015	0.000015	0.000015
2	0.000055	0.000055	0.000055
3	0.000025	0.000025	0.000025
4	0.000015	0.000015	0.000015
5	0.0001	0.0001	0.0001
6	0.001	0.001	0.001
7	0.0001	0.0001	0.0001

Zona	$S_y$
1	0.15
2	0.25
3	0.25
4	0.15
5	0.05
6	0.1
7	0.05

CI66J

- INTRODUCCION
- VISUAL MODFLOW
  - GENERAL
  - MALLA
  - PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS
  - **ACCIONES EXTERNAS**
  - CONDICIONES DE BORDE
  - CONDICIONES INICIALES
  - OPERACION
- FORTALEZAS/DEBILIDADES

CI66J

## VISUAL MODFLOW

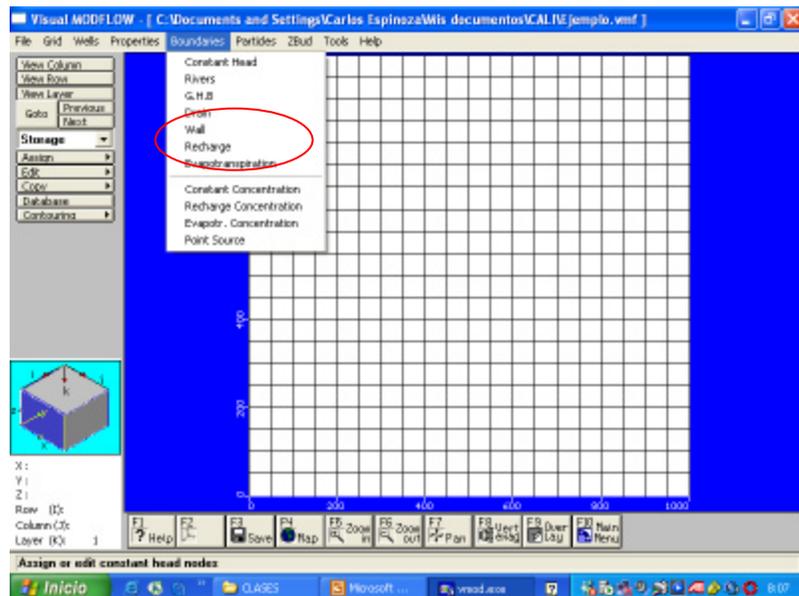
Las dos acciones externas que se debe considerar en un modelo de simulación de aguas subterráneas son la recarga y la extracción.

La recarga se obtiene mediante el balance hídrico. Debe evaluarse no sólo la recarga natural sino además el volumen recargado por riego o por mecanismos artificiales. No se incluye el efecto de recargas en cursos de agua, ya que estas se indican en las condiciones de borde.

La extracción incluye aquella realizada mediante pozos de bombeo como también aquella que ocurre por otros mecanismos como la evapotranspiración.

ACCIONES EXTERNAS

CI66J



CI66J

## VISUAL MODFLOW

Las áreas de recarga más comunes ocurren por efectos de la precipitación, la cual percola y se incorpora al sistema de aguas subterráneas.

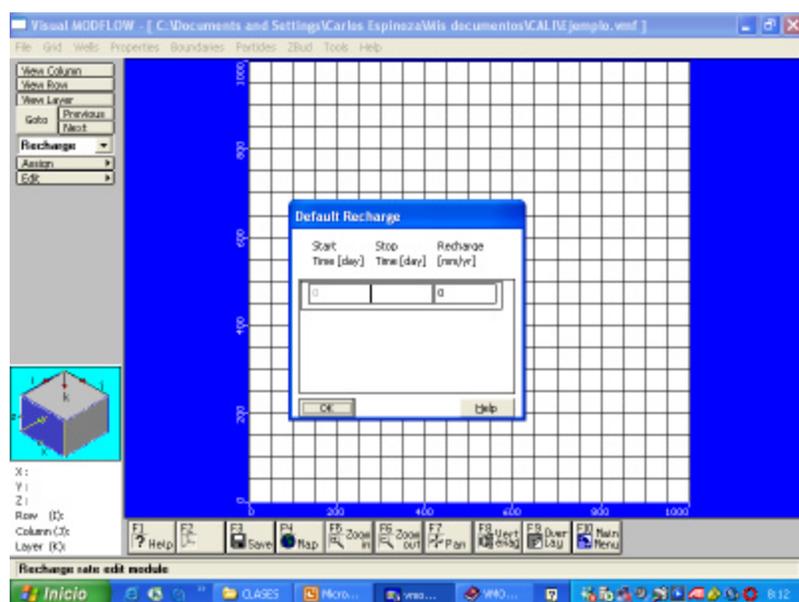
Mediante Visual MODFLOW es posible simular la recarga de otras fuentes, tales como recargas artificiales (Visual MODFLOW User's Manual).

Para asignar la recarga a las celdas seleccionadas sólo se debe ingresar el tiempo inicio, el tiempo fin y el valor de la recarga.

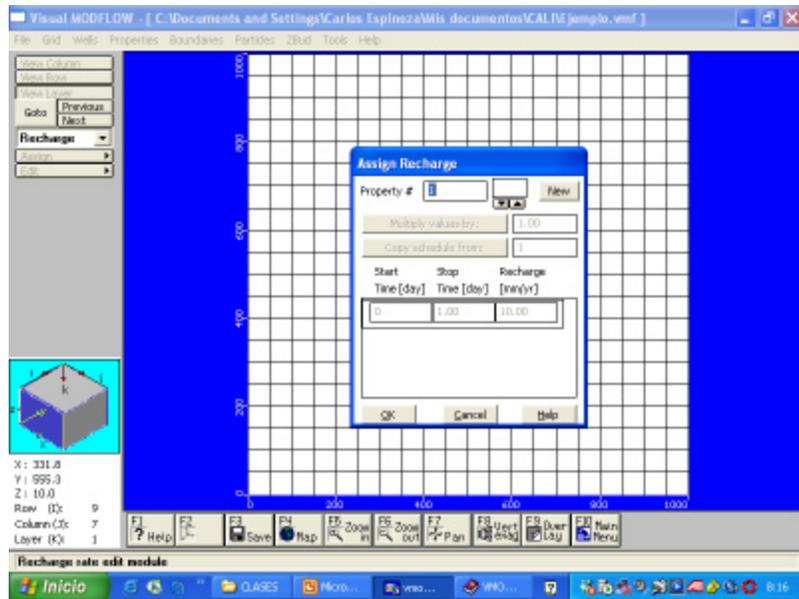


RECARGA SUPERFICIAL

CI66J

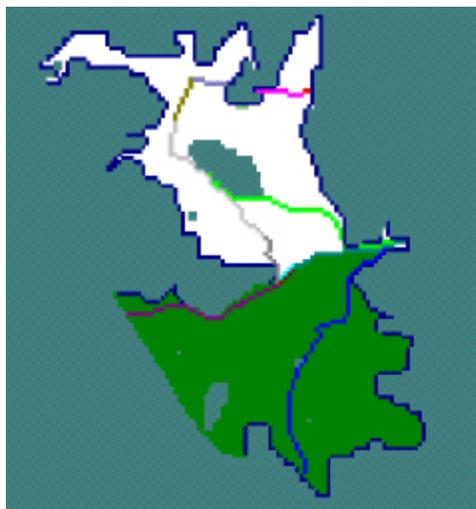


CI66J



CI66J

## Modelo Hidrogeológico Recargas



CI66J

## VISUAL MODFLOW

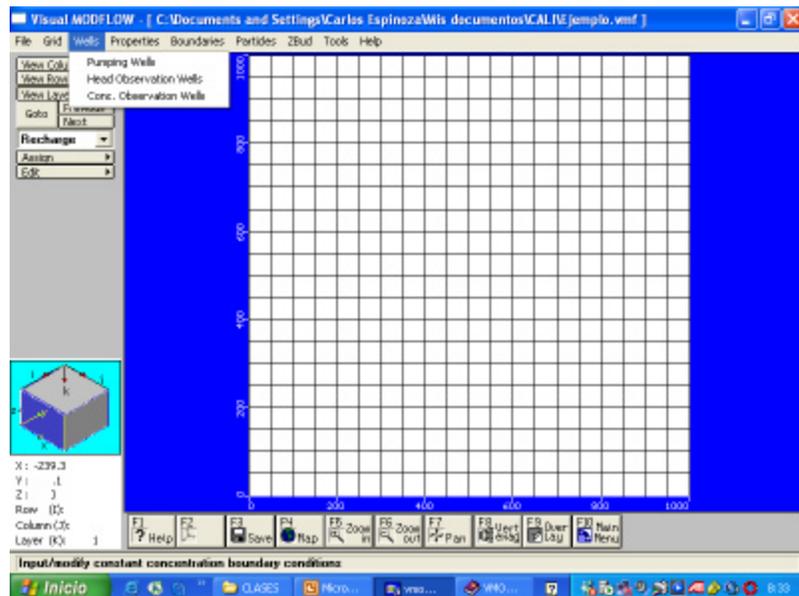
Un aspecto importante en la modelación de un determinado sistema es la incorporación de pozos de bombeo o recarga. Visual MODFLOW permite incorporar (o eliminar) pozos en forma gráfica. Los tipos de pozos que se pueden definir en Visual MODFLOW son:

- Pozos de extracción:** Se definen asignando una tasa de extracción negativa.
- Pozos de inyección:** Se definen asignando una tasa de extracción positiva.
- Pozos de observación:** Estos pozos pueden ser utilizados como puntos de observación para las cargas hidráulicas.



POZOS DE BOMBEO

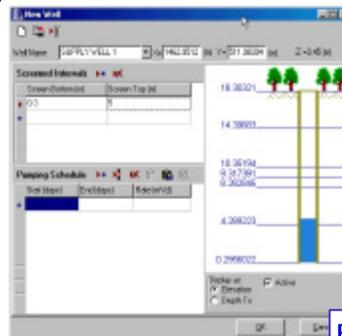
CI66J



CI66J

## VISUAL MODFLOW

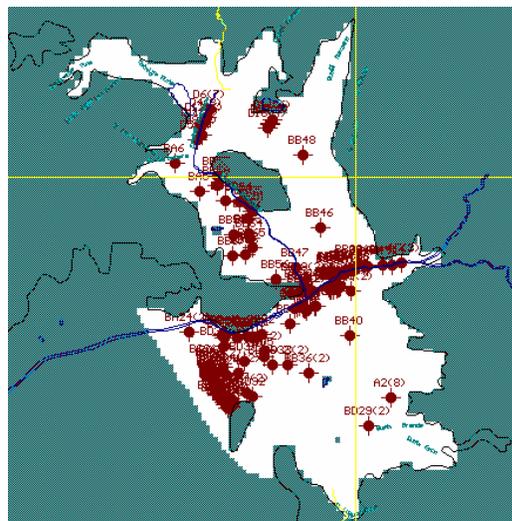
Un pozo queda definido al especificar su nombre dentro del modelo, su tasa de extracción (o inyección), tiempo de funcionamiento (inicio y término), profundidad, coordenadas y ubicación de cribas (dónde efectivamente se extrae o se inyecta el agua).



POZOS DE BOMBEO

CI66J

## Modelo Hidrogeológico Distribución de Pozos



CI66J

## Modelo Hidrogeológico Pozos de Observación



CI66J

### VISUAL MODFLOW

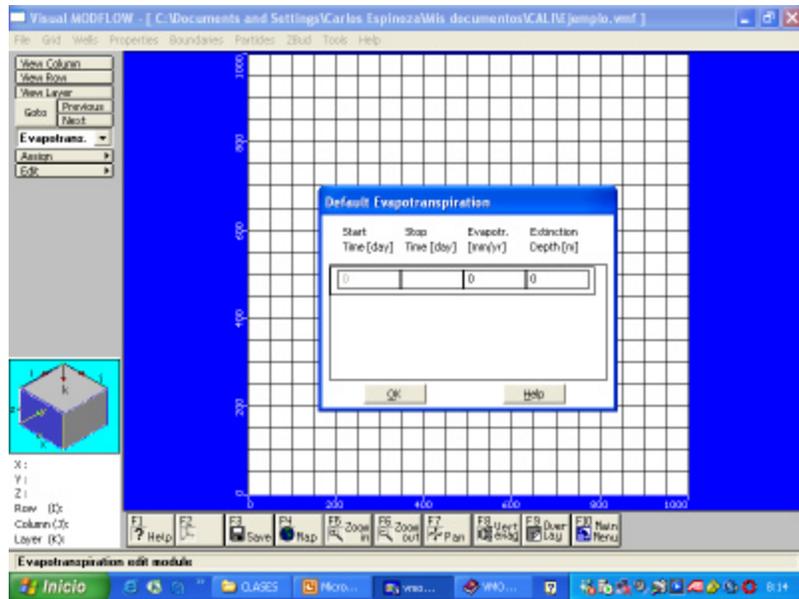
Evapotranspiración se incluye en MODFLOW a través del paquete Evapotranspiration Package (ET). Este paquete simula el efecto de la transpiración de plantas y la evaporación directa desde el suelo removiendo agua desde el sistema saturado. El enfoque de cálculo se basa en los siguientes supuestos:

- Cuando el nivel freático está sobre el nivel de terreno (sobre estrato 1) la pérdida por evapotranspiración ocurre a una tasa máxima indicada por el usuario.
- Cuando el nivel freático está por debajo de la profundidad de extinción, o bajo el estrato 1, la ET es nula.
- Entre esos límites la ET varía entre el máximo y cero.

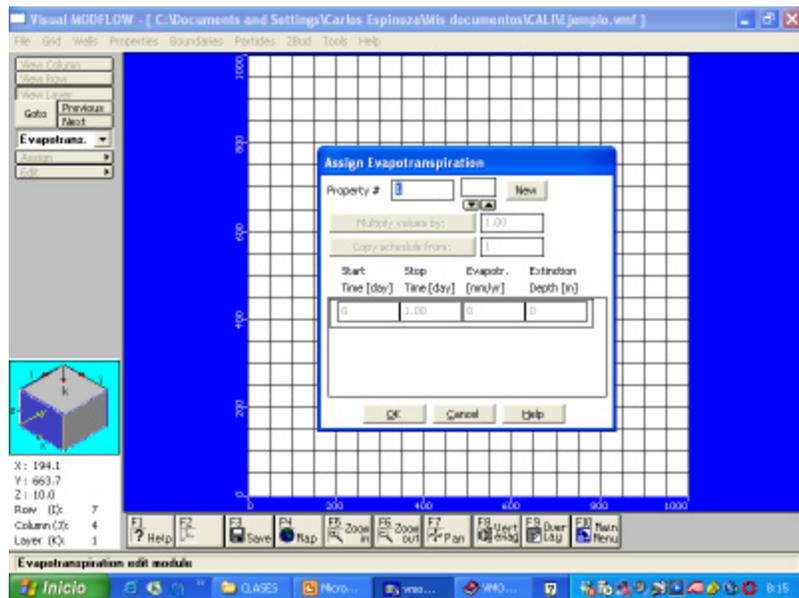
EVAPOTRANSPIRACION



CI66J

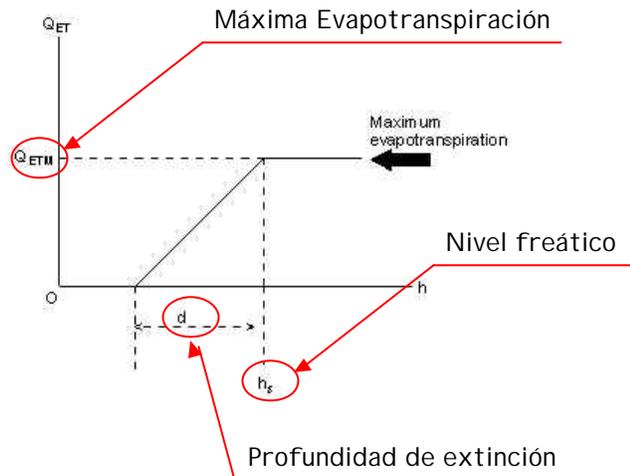


CI66J



CI66J

## VISUAL MODFLOW



CI66J

- INTRODUCCION
- VISUAL MODFLOW
  - GENERAL
  - MALLA
  - PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS
  - ACCIONES EXTERNAS
  - **CONDICIONES DE BORDE**
  - CONDICIONES INICIALES
  - OPERACION
- FORTALEZAS/DEBILIDADES



CI66J

## VISUAL MODFLOW

Una modelación numérica de flujo necesita datos iniciales del sistema y datos de funcionamiento del mismo.

Dentro de las condiciones de borde se especifican las siguientes:

### Bordes con carga conocida:

- Carga hidráulica conocida

### Bordes con flujos dependientes de la carga:

- Recarga desde río
- Drenes
- General Head Boundary

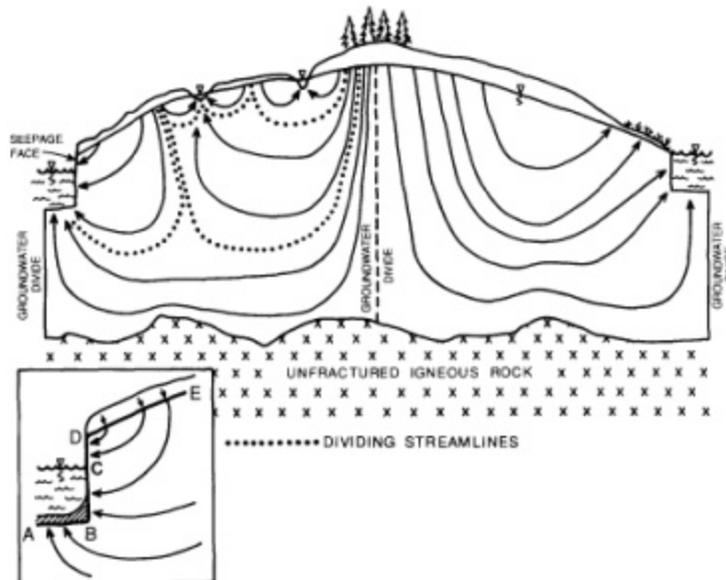
### Bordes de no flujo

- Muro (Wall)

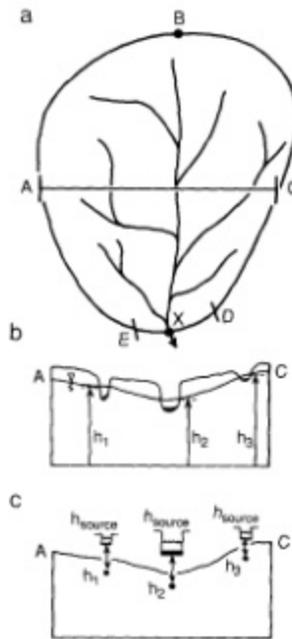
CONDICIONES DE BORDE E INICIALES



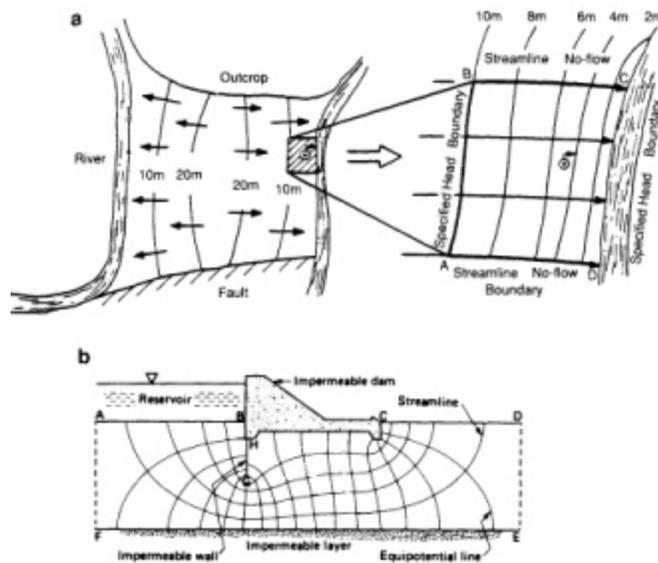
CI66J



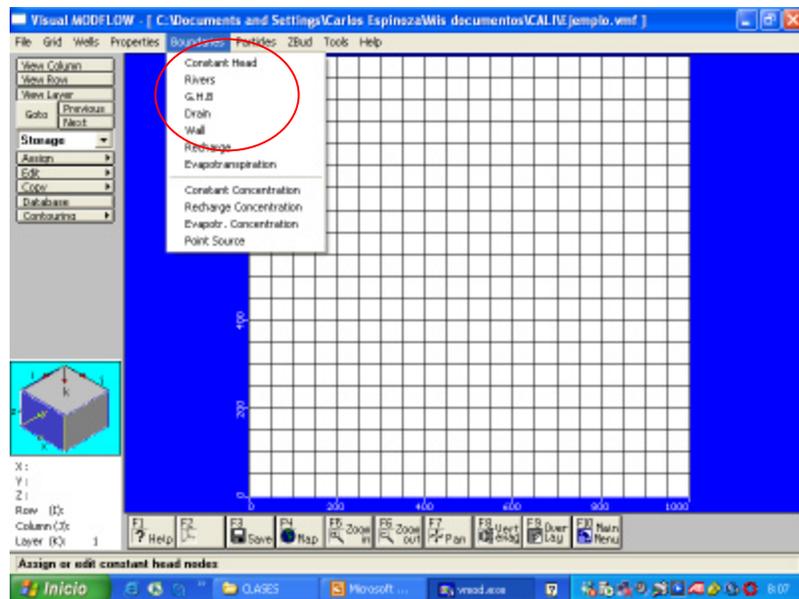
CI66J



CI66J



CI66J



## VISUAL MODFLOW

### Bordes con carga conocida:

En aquellos puntos en los cuales se conoce a priori el valor del potencial piezométrico se tiene una condición de borde conocida.

CONDICIONES DE BORDE E INICIALES

CI66J

## VISUAL MODFLOW

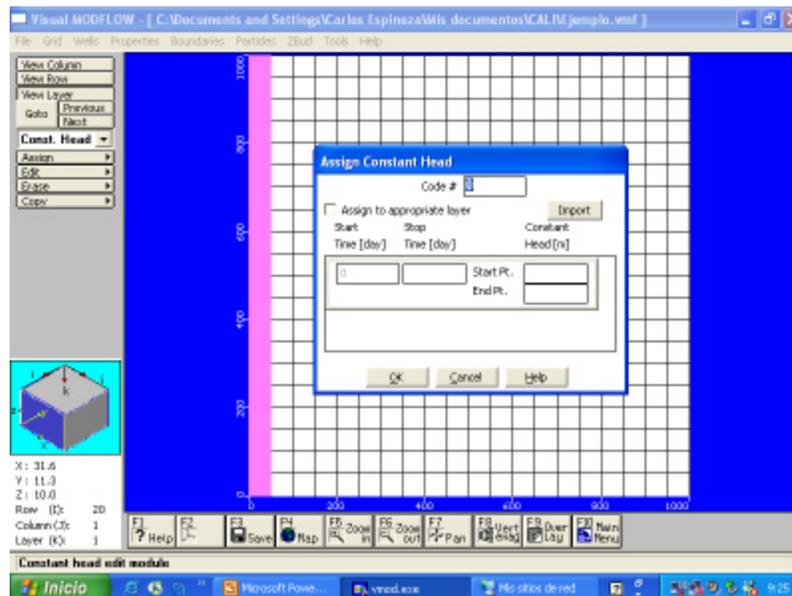
Es posible asignar, en determinadas zonas y capas de la región modelada, la condición de carga constante con sólo seleccionar dicha alternativa y marcar en el plano base los sectores que tienen carga constante.

Al asignar carga constante a alguna zona se debe definir:

- Tiempo Inicio**; tiempo en que se comienza a aplicar la condición de borde.
- Tiempo Final**; tiempo en que se deja de aplicar la condición de borde.
- Valor inicial y final de la carga (m)**; si estos valores son distintos, Visual MODFLOW interpola linealmente en el tiempo (final e inicial).

CONDICION DE BORDE CONSTANTE

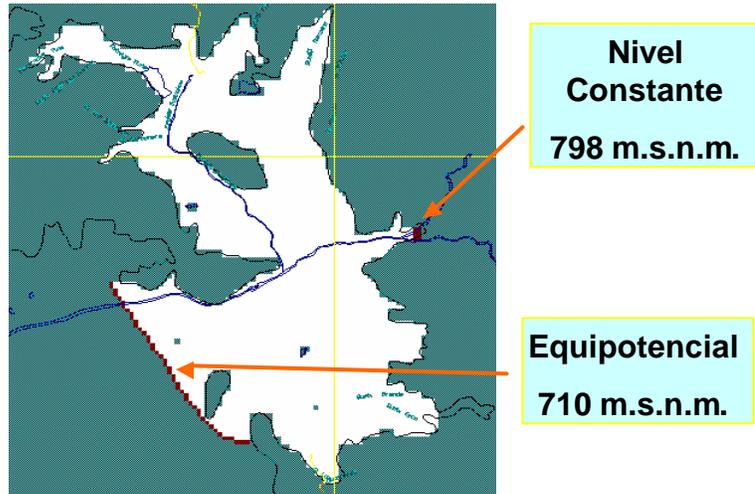
CI66J



CI66J

## Modelo Hidrogeológico

### Condiciones de Borde



CI66J

### VISUAL MODFLOW

Bordes con flujos dependientes de la carga:

- Recarga desde río
- Drenes
- General Head Boundary

CONDICIONES DE BORDE E INICIALES

CI66J

## VISUAL MODFLOW

Con esta opción, Visual MODFLOW permite incorporar una condición de aguas superficiales dentro de un modelo de flujo de aguas subterráneas.

De esta manera es posible simular las interrelaciones entre cuerpos de agua superficiales y sistemas de aguas subterráneas, los cuales, dependiendo del gradiente hidráulico entre el cuerpo de agua superficial y el régimen de aguas subterráneas, pueden ser aportes de la napa al cuerpo superficial o en sentido contrario



CONDICION DE BORDE DE RIO

CI66J

## VISUAL MODFLOW

La información necesaria de definir en cada una de las celdas que poseen esta condición de borde es la siguiente:

- Cota o elevación de la superficie libre del cuerpo de agua;** esta condición puede variar en el tiempo.
- Cota del fondo del río.**
- Conductancia;** corresponde a un parámetro numérico que representa la resistencia al flujo entre el cuerpo de agua superficial y el agua subterránea.

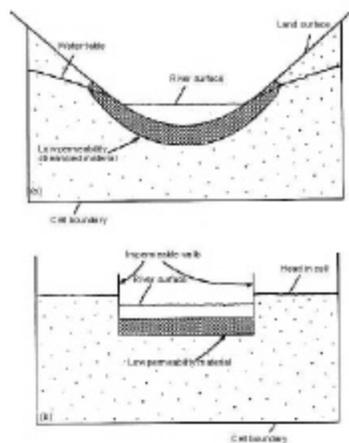


CONDICION DE BORDE DE RIO

CI66J

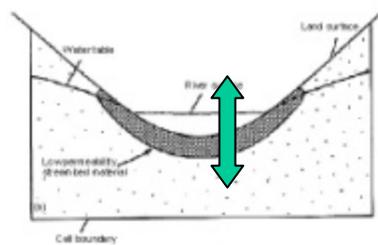
## VISUAL MODFLOW

Recarga desde Río:



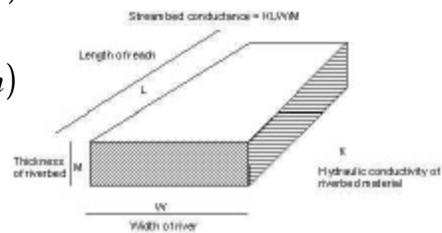
CI66J

## VISUAL MODFLOW

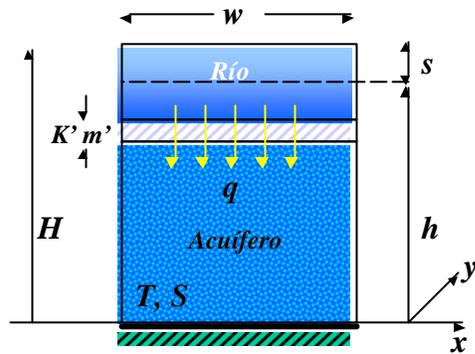


$$Q_{RIV} = \frac{KLW}{M} \cdot (HRIV - h)$$

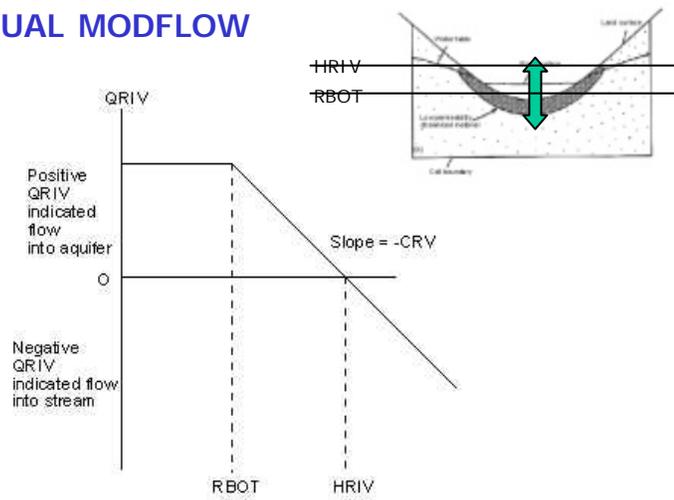
$$Q_{RIV} = CRIV \cdot (HRIV - h)$$



El río es simulado utilizando la ley de Darcy



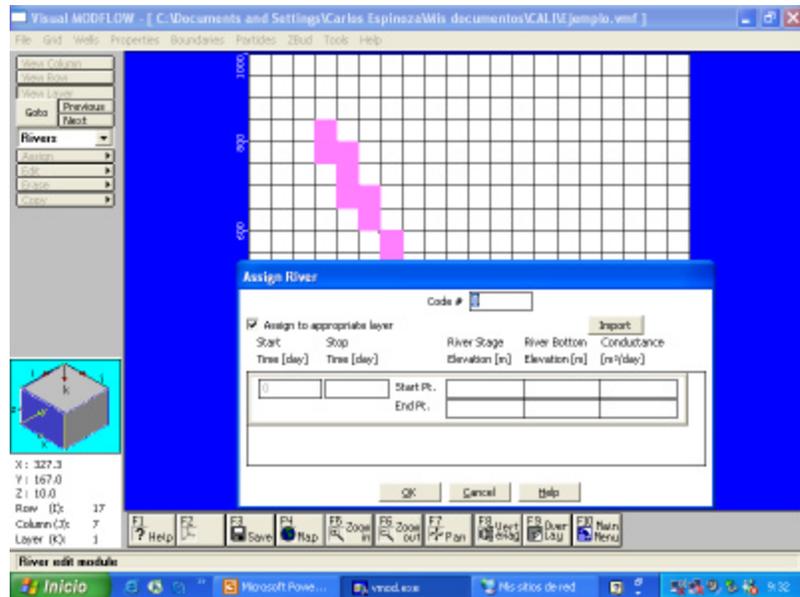
VISUAL MODFLOW



$$QRIV = CRIV \cdot (HRIV - h)$$



CI66J



CI66J

## VISUAL MODFLOW

Esta condición fue desarrollada para simular los efectos de drenajes, como los que se presentan en zonas agrícolas, en donde estos drenes remueven agua del acuífero a una tasa proporcional a la diferencia de carga entre la del acuífero y alguna elevación o carga fijada.

La información que se requiere definir en cada una de las celdas que poseen esta condición de borde es la siguiente:

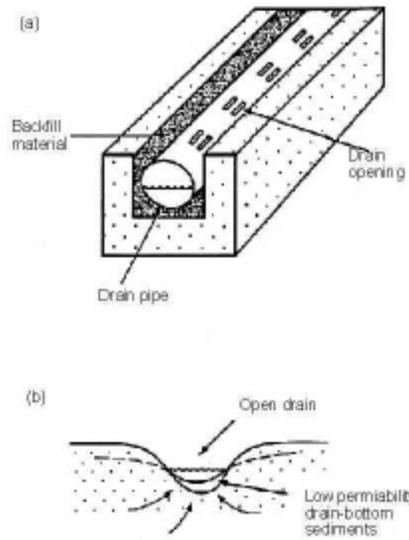
- Cota del dren;** corresponde a la carga del dren de la superficie libre dentro de éste.
- Conductancia;** parámetro que describe la pérdida de carga entre el dren y el sistema de aguas subterráneas.

CONDICION DE BORDE DE DREN

CI66J

## VISUAL MODFLOW

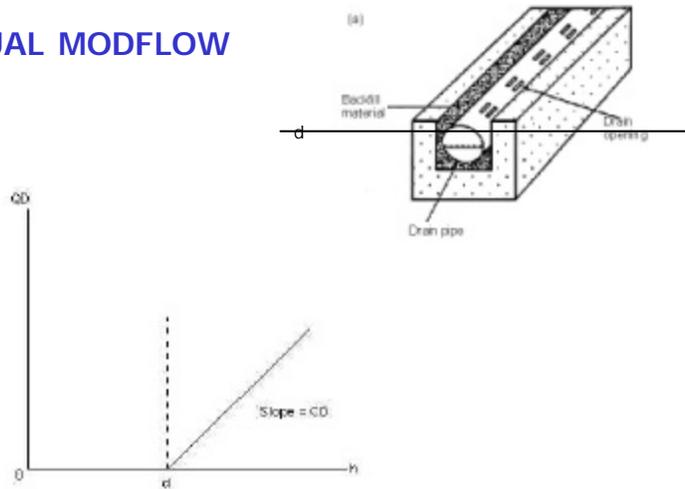
Dren:



CI66J

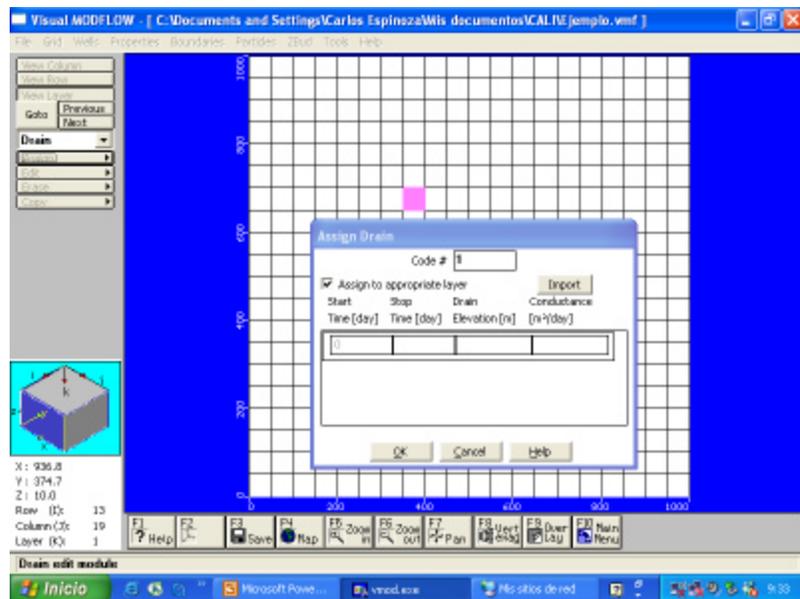
## VISUAL MODFLOW

Dren:



$$QD = CD \cdot (h - d)$$

CI66J



CI66J

## VISUAL MODFLOW

Con esta opción, Visual MODFLOW permite incorporar o extraer agua desde un modelo de flujo de aguas subterráneas.

De esta manera es posible simular las interrelaciones entre cuerpos de agua superficiales y sistemas de aguas subterráneas, los cuales, dependiendo del gradiente hidráulico entre el cuerpo de agua superficial y el régimen de aguas subterráneas, pueden ser aportes de la napa al cuerpo superficial o en sentido contrario

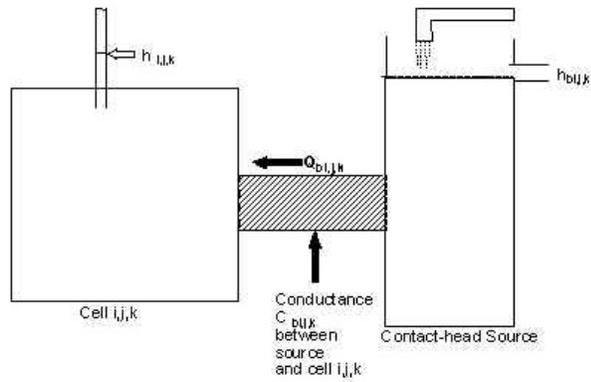
Esta condición funciona de manera similar a las condiciones de río, dren y evapotranspiración, pero no tiene limitaciones.

**CONDICION DE BORDE GENERAL**

CI66J

## VISUAL MODFLOW

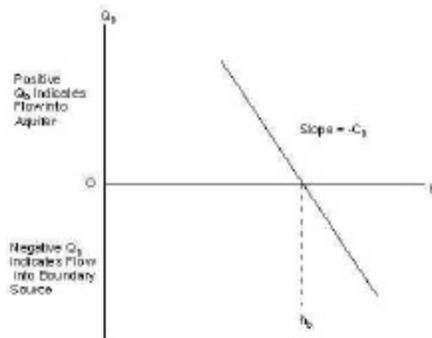
General Head Boundary:



CI66J

## VISUAL MODFLOW

General Head Boundary:



$$Q_b = C_b \cdot (h - h_b)$$



CI66J

- INTRODUCCION
- VISUAL MODFLOW
  - GENERAL
  - MALLA
  - PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS
  - ACCIONES EXTERNAS
  - CONDICIONES DE BORDE
  - **CONDICIONES INICIALES**
  - OPERACION
- FORTALEZAS/DEBILIDADES



CI66J

## VISUAL MODFLOW

Una red de monitoreo debiera haber sido definida previamente con este propósito. Los pozos seleccionados deben reproducir fielmente el comportamiento real que se pretende simular.

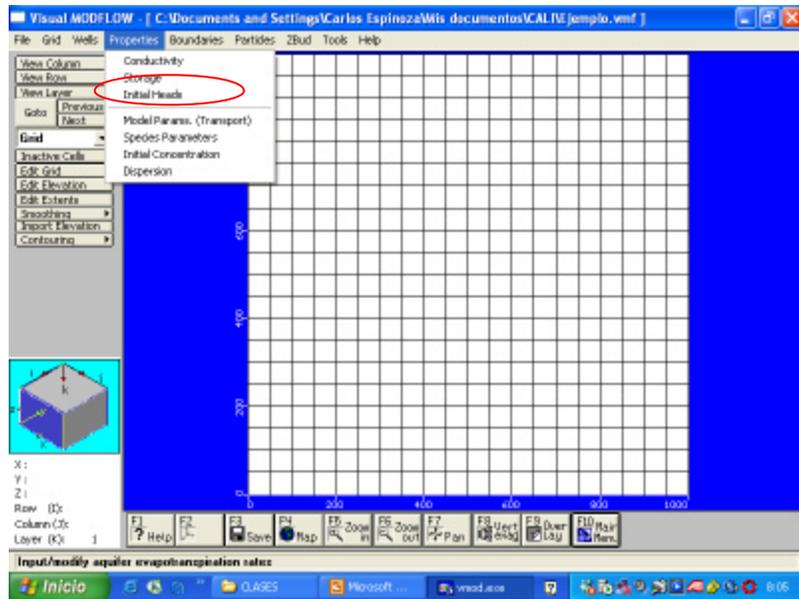
Una serie completa de medidas tiene que haberse efectuado en un breve lapso de tiempo para que responda a una "fotografía" representativa de la situación.

El mapa inicial de superficies piezométricas (sistema inalterado) de cada capa es la base a reproducir en la simulación en estado estacionario.

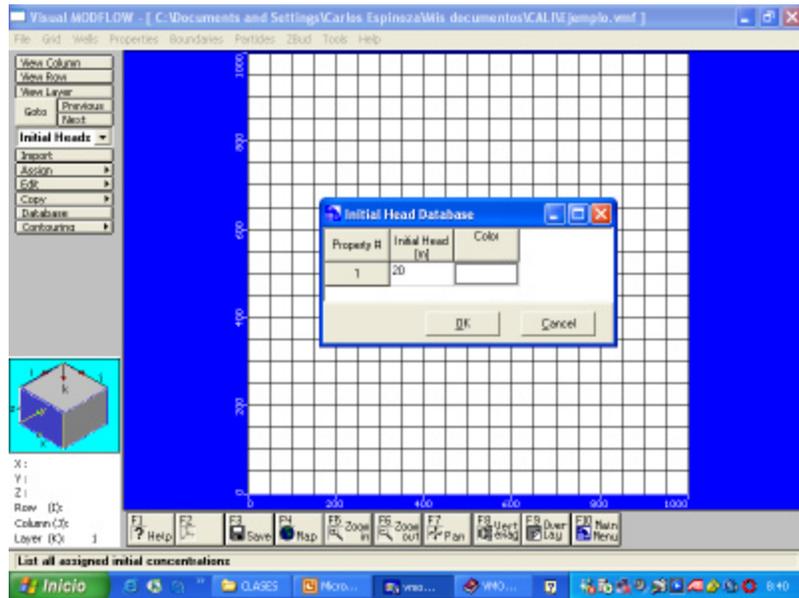


CONDICIONES INICIALES

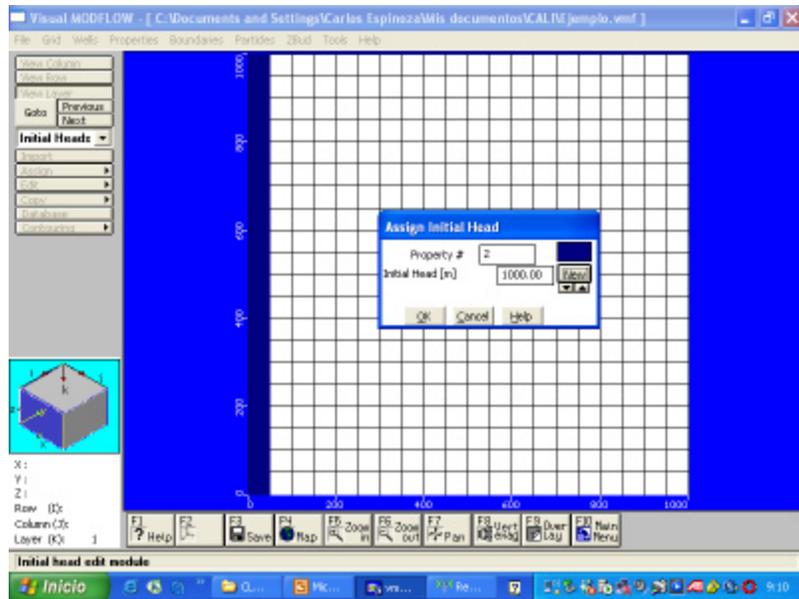
CI66J



CI66J

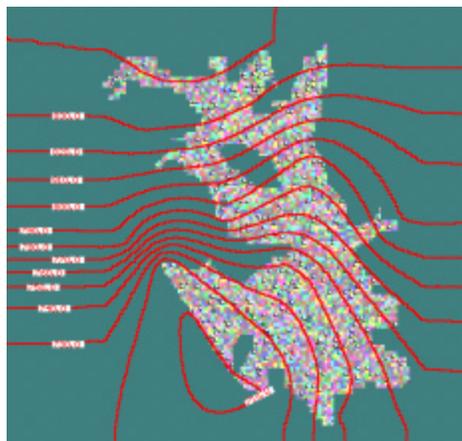


CI66J



CI66J

## Modelo Hidrogeológico Condiciones Iniciales



Condición Inicial :

1 Dic 96

CI66J

- **INTRODUCCION**
- **VISUAL MODFLOW**
  - GENERAL
  - MALLA
  - PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS
  - ACCIONES EXTERNAS
  - CONDICIONES DE BORDE
  - CONDICIONES INICIALES
  - **OPERACION**
- **FORTALEZAS/DEBILIDADES**



CI66J

## VISUAL MODFLOW

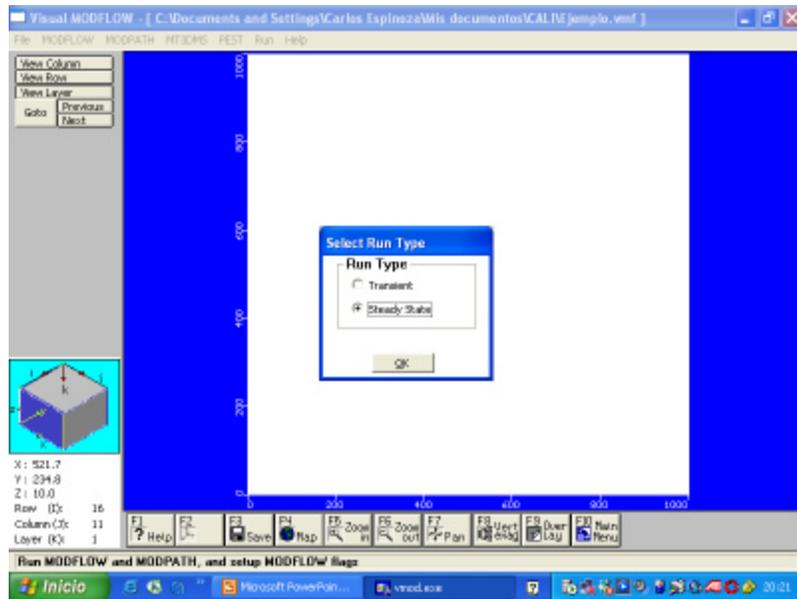
Una vez ingresados los datos necesarios para la ejecución del modelo antes mencionado es posible poder ejecutar el modelo y resolver un problema de flujo de aguas subterráneas particular.

Los resultados entregados por Visual MODFLOW pueden ser visualizados gráficamente en el mismo plano base, en donde se pueden observar velocidades (existiendo las alternativas de representar su dirección, magnitud o proyección) y además se pueden representar curvas isofreáticas, líneas de flujo, trayectorias de trazadores y otros.

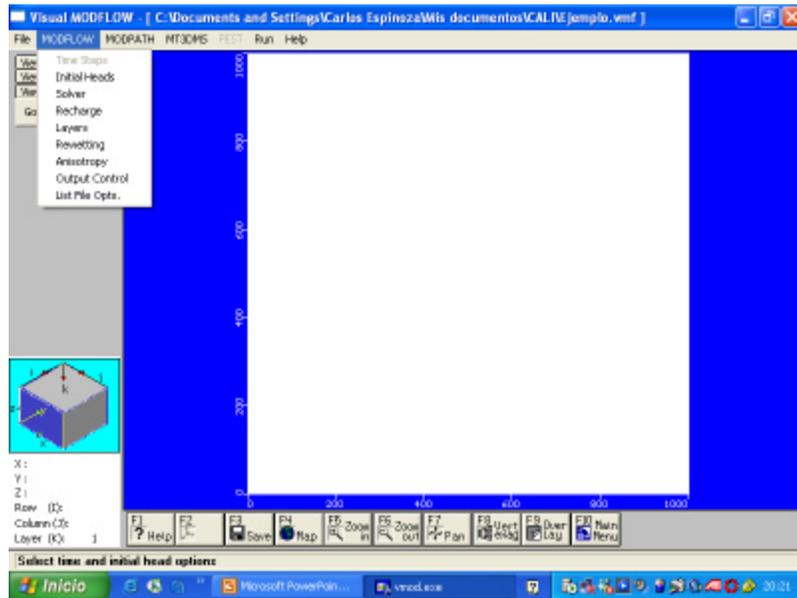


[OPERACIÓN MODFLOW](#)

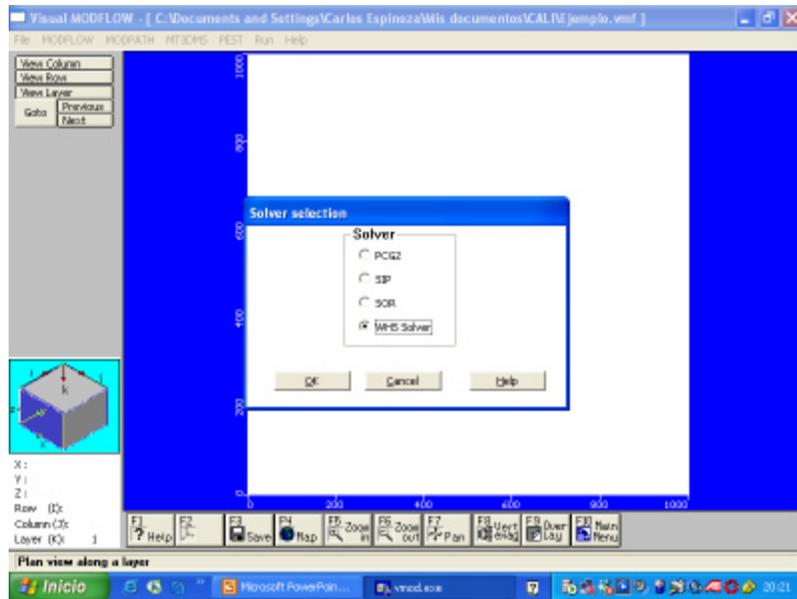
CI66J



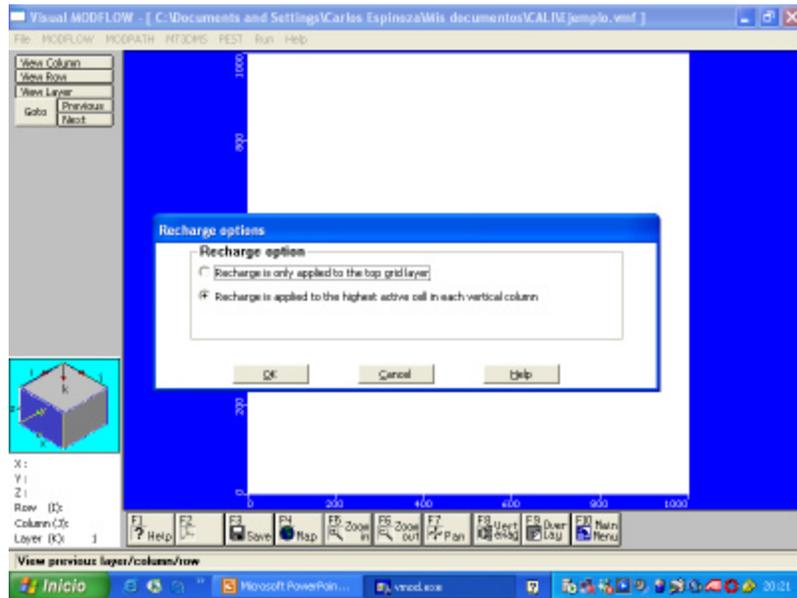
CI66J



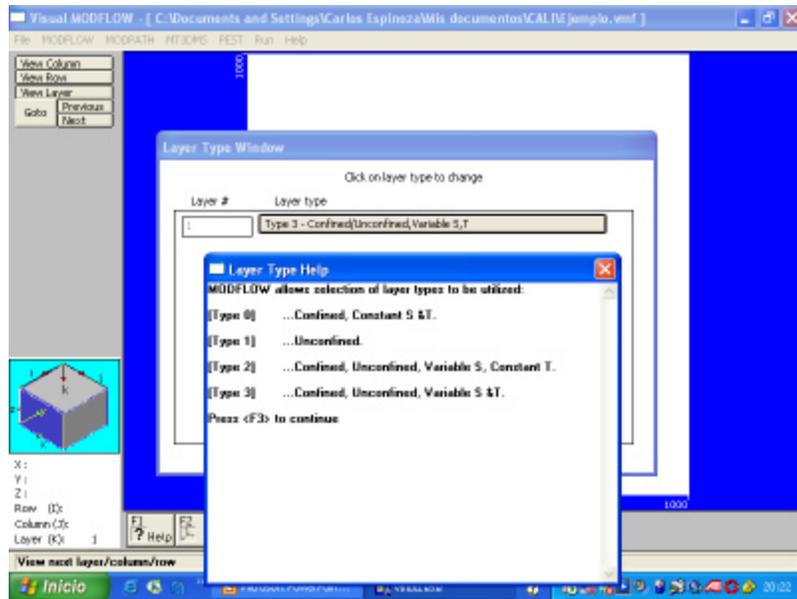
CI66J



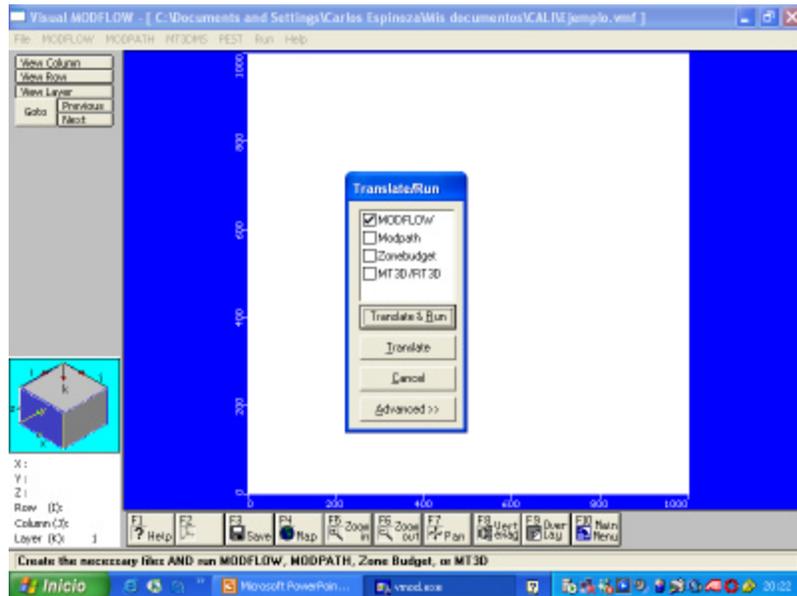
CI66J



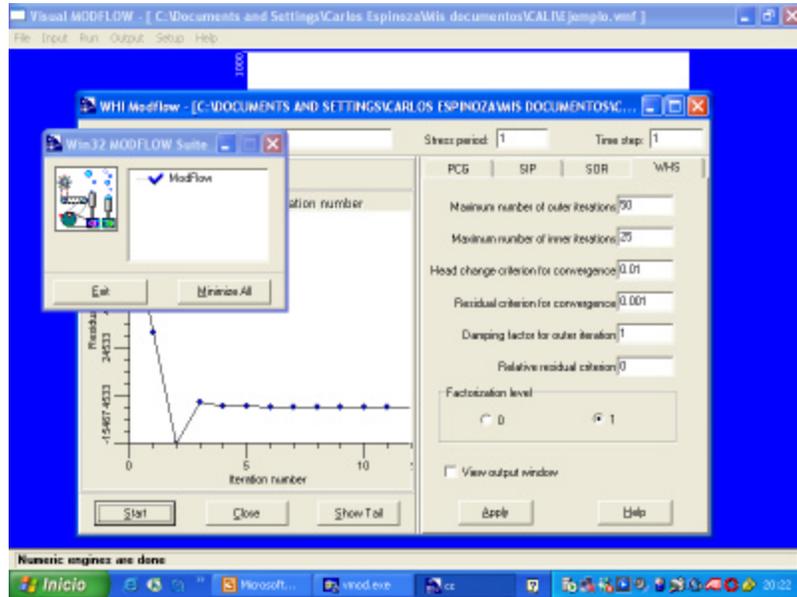
CI66J



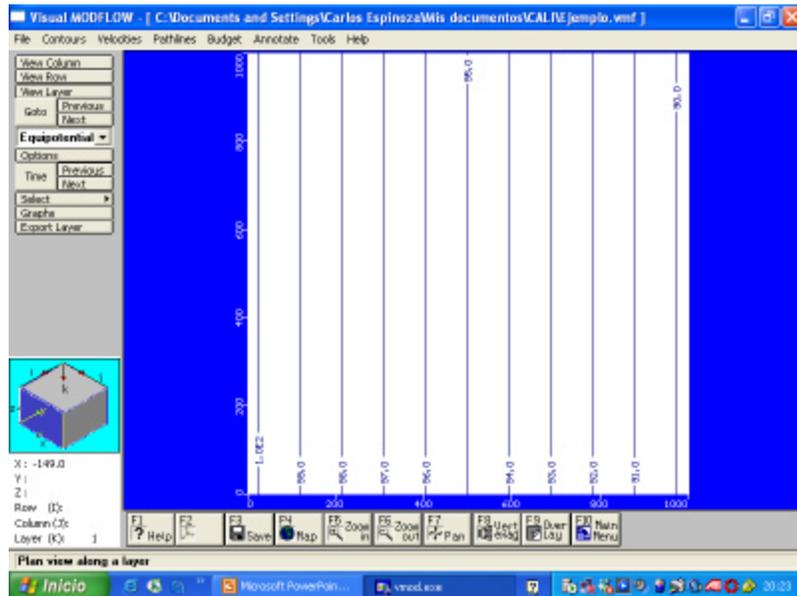
CI66J



CI66J



CI66J





CI66J

## Modelo Hidrogeológico Equipotenciales y Flujo día 289

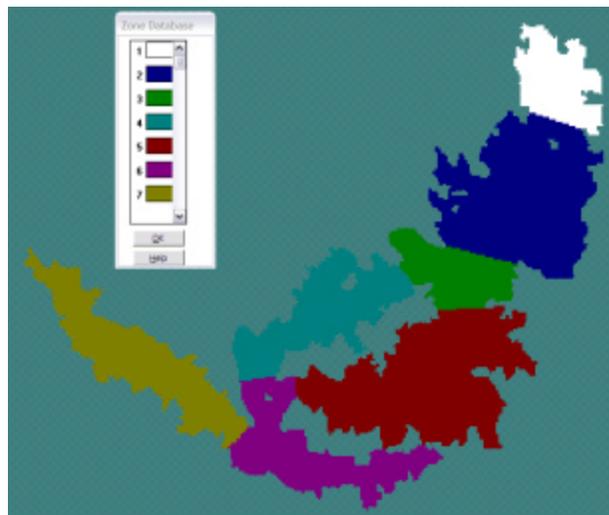
---



CI66J

## ZONAS DE BALANCE

---



## ZONAS DE BALANCE

Zone Budget Output

Zone: 4    Output Time: 1    Stress Period: 1

Input	Output
Storage = 35731.000000 m <sup>3</sup> /day	Storage = 2195.900000 m <sup>3</sup> /day
Constant Head = 0.000000 m <sup>3</sup> /day	Constant Head = 0.000000 m <sup>3</sup> /day
Wells = 32715.000000 m <sup>3</sup> /day	Wells = 34132.000000 m <sup>3</sup> /day
Drains = 0.000000 m <sup>3</sup> /day	Drains = 0.000000 m <sup>3</sup> /day
Recharge = 29536.000000 m <sup>3</sup> /day	Recharge = 0.000000 m <sup>3</sup> /day
Et = 0.000000 m <sup>3</sup> /day	Et = 0.000000 m <sup>3</sup> /day
River Leakage = 48057.000000 m <sup>3</sup> /day	River Leakage = 164940.000000 m <sup>3</sup> /day

Difference

IN - OUT = -696.730000 m<sup>3</sup>/day

Percent Discrepancy = -0.250000%

Prev Zone    Next Zone    OK

- INTRODUCCION
- VISUAL MODFLOW
  - GENERAL
  - MALLA
  - PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS
  - ACCIONES EXTERNAS
  - CONDICIONES DE BORDE
  - CONDICIONES INICIALES
  - OPERACION
- FORTALEZAS/DEBILIDADES

CI66J

## FORTALEZAS Y DEBILIDADES

El modelo de flujo Visual MODFLOW corresponde a uno de los modelos más utilizados internacionalmente para este tipo de estudios (flujo de aguas subterráneas), siendo un modelo ampliamente probado y de comprobada eficacia en la resolución y representación de problemas de flujo en tres dimensiones.

Por lo anterior, la utilización de Visual MODFLOW es favorablemente aceptada por los sectores industriales y gubernamentales en distintos países.

El esquema de resolución numérico empleado por el modelo corresponde a un esquema de diferencias finitas, el cual entrega soluciones aceptables a los problemas modelados, a través de una metodología numéricamente sencilla.



FORTALEZAS

CI66J

## FORTALEZAS Y DEBILIDADES

La representación gráfica de la modelación facilita el ingreso de los datos, la visualización de resultados, etc.

Al ser un modelo cuasitridimensional, Visual MODFLOW está capacitado para representar de una manera más realistas los problemas modelados.



FORTALEZAS

CI66J

## FORTALEZAS Y DEBILIDADES

Una de las más grandes debilidades de Visual MODFLOW, producto de su formulación numérica, la imposibilidad de llenar celdas secas, las que se vacían durante el proceso de cálculo. Esto lleva a cometer errores de cálculo al momento de cuantificar caudales de extracción o direcciones de flujos.

La resolución numérica al utilizar el método de diferencias finitas trabaja mejor con acuíferos rectangulares o prismáticos y de composición uniforme, por lo que la modelación de acuíferos irregulares o curvos, con propiedades de anisotropía y heterogeneidad son difíciles de resolver mediante esta metodología.



DEBILIDADES