

CI66J

CI 66J/CI 71T MODELACION DE AGUAS SUBTERRANEAS

MODELACION HIDROGEOLOGICA



- **INTRODUCCION**
- **ETAPAS EN LA CONSTRUCCION DE UN MODELO DE SIMULACION HIDROGEOLOGICO**
 - ETAPA A: MODELO CONCEPTUAL
 - ETAPA B: MODELO HIDROGEOLOGICO
 - ETAPA C: USO Y POSTAUDITORIA
- **CONCLUSIONES**



¿QUE ES UN MODELO DE SIMULACION HIDROGEOLOGICO?

Una **representación matemática o numérica** que simplifica la compleja hidrología, hidrogeología y química de un sitio seleccionado (Sistema Básico de Aguas Subterráneas).

Utiliza las **ecuaciones** que gobiernan el flujo y conservación de la masa para simular flujo de agua y transporte de sustancias contaminantes en el medio poroso.

IGWMC (1993) define un modelo de simulación hidrogeológico como "una descripción matemática, no única, simplificada de un sistema de aguas subterráneas existente, codificado en un lenguaje de programación, junto con una cuantificación del sistema acuífero que incluya las condiciones de borde relevantes, los parámetros del sistema, así como las presiones o acciones sobre éste".



¿QUE ES UN SISTEMA DE AGUAS SUBTERRANEAS?

Un conjunto de entradas controladas tales como precipitación, flujo superficial, recarga natural, recarga por riego, ríos y recarga artificial.

Salidas del sistema son los flujos subterráneos, vertientes y manantiales, consumos evapotranspirativos y descargas a fuentes superficiales.

Un número de parámetros que describen el sistema.

Variables dinámicas que caracterizan la condición del sistema: carga hidráulica, presión, temperatura, flujo, y concentración.

Un conjunto de variables de decisión: bombeo, tasa de inyección.



¿RESULTADOS DE UN MODELO DE SIMULACION HIDROGEOLOGICO?

La solución o resultado de un modelo de simulación hidrogeológico corresponde a la distribución de los niveles de agua (acuífero libre) o niveles de energía o piezométricos (acuífero confinado) a través del espacio y tiempo.

Los resultados anteriores permiten determinar la magnitud y dirección del escurrimiento de agua subterránea, la que puede ser afectada por acciones externas o procesos naturales.

Para el estudio de problemas de transporte de contaminante en agua subterráneas es imprescindible contar con la información del **modelo de flujo**.



¿ESQUEMA TIPO DE UN MODELO DE SIMULACION HIDROGEOLOGICO?

RESOLVER
PROBLEMA DE
FLUJO

$$\nabla \cdot (K \cdot \nabla h) - R = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$$



DETERMINAR
VELOCIDAD

$$v = -\underline{K} \cdot \nabla h$$



RESOLVER
PROBLEMA DE
TRANSPORTE

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \cdot \nabla C) - \nabla \cdot (vC)$$



- **INTRODUCCION**
- **ETAPAS EN LA CONSTRUCCION DE UN MODELO DE SIMULACION HIDROGEOLOGICO**
 - ETAPA A: MODELO CONCEPTUAL
 - ETAPA B: MODELO HIDROGEOLOGICO
 - ETAPA C: USO Y POSTAUDITORIA
- **CONCLUSIONES**



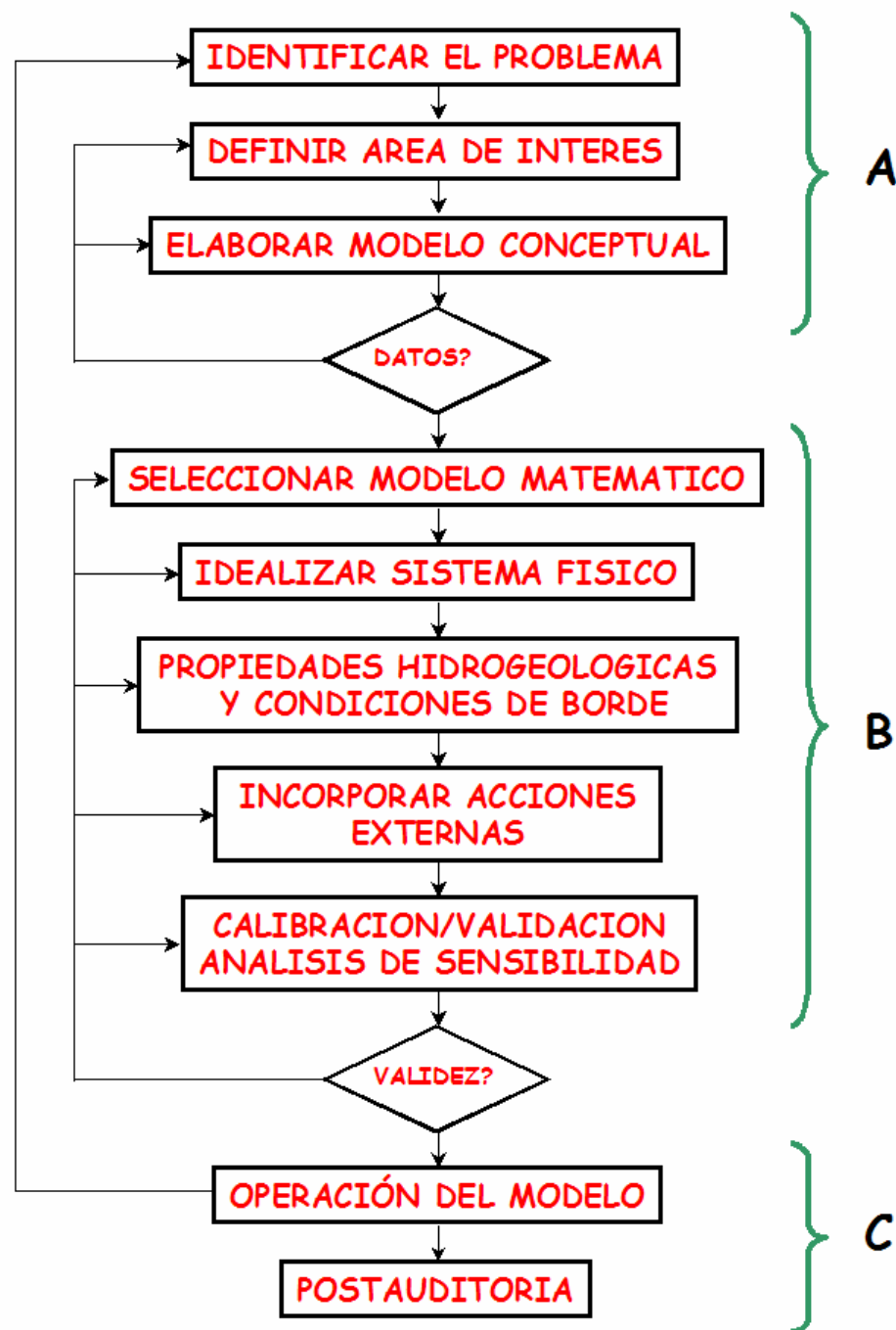
ETAPAS EN EL DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACION HIDROGEOLOGICO

Se puede identificar 10 actividades o pasos relevantes para la elaboración de un modelo de simulación hidrogeológico.

Se puede identificar tres macroactividades o etapas. La primera etapa se orienta a elaborar un modelo conceptual de la zona de estudio (A). La segunda etapa es la construcción del modelo propiamente tal (B), y la tercera etapa incluye su uso posterior (C).

El modelo se contruye en base a observaciones reales y percepciones sobre el sistema hidrogeológico y el problema a analizar (conceptualización).

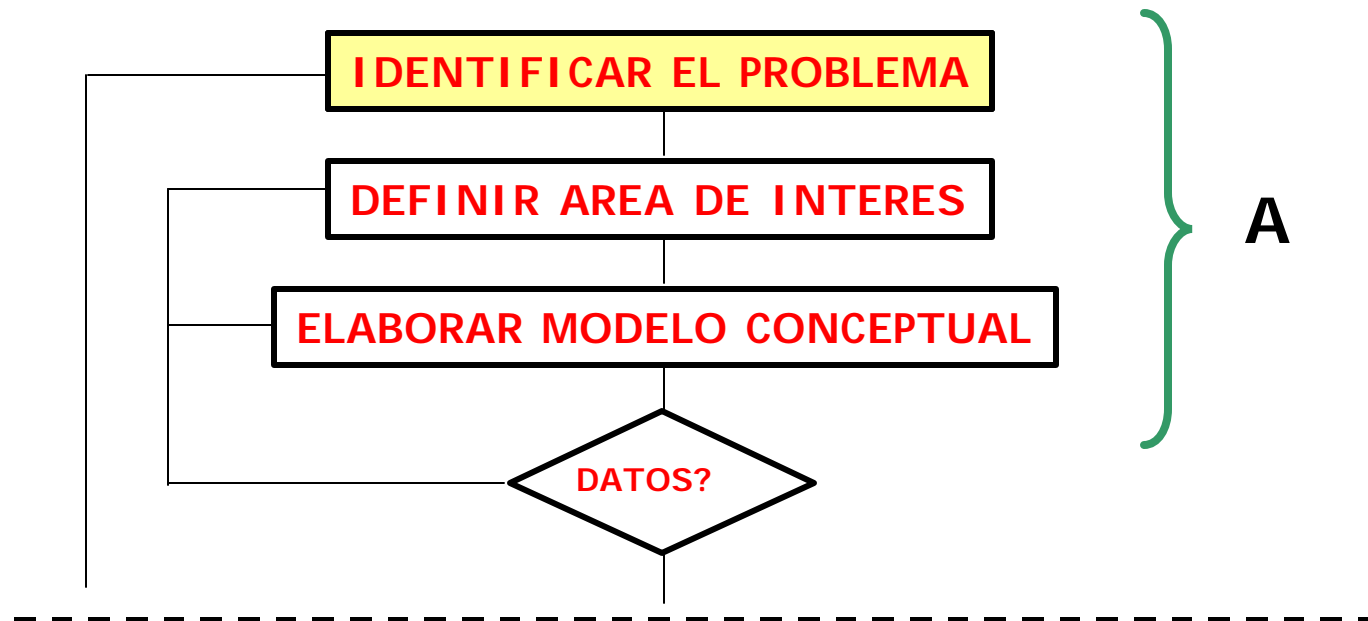




- **INTRODUCCION**
- **ETAPAS EN LA CONSTRUCCION DE UN MODELO DE SIMULACION HIDROGEOLOGICO**
 - **ETAPA A: MODELO CONCEPTUAL**
 - **ETAPA B: MODELO HIDROGEOLOGICO**
 - **ETAPA C: USO Y POSTAUDITORIA**
- **CONCLUSIONES**



ETAPA A: MODELO CONCEPTUAL



IDENTIFICAR EL PROBLEMA Y FORMULAR OBJETIVOS DE LA MODELACION

Este primer paso incluye la definición de la naturaleza del problema y la evaluación del propósito u objetivo del modelo.

Generalmente es subdimensionado y no tomado como un paso importante (hasta que es muy tarde!!!!).

Muy relacionado con el desarrollo del modelo conceptual.

Identificar procesos de importancia, evaluar preliminarmente el nivel de información disponible, escala del problemas a estudiar, dimensionalidad del problema (1D, 2D, 3D), uso posterior del modelo, determinístico o probabilístico.



IDENTIFICAR EL PROBLEMA Y FORMULAR OBJETIVOS DE LA MODELACION

Buen juicio para evaluar y balancear los requerimientos de precisión o exactitud versus el costo de implementar un modelo y generar la información necesaria.

EJEMPLOS

Estudiar el comportamiento global del sistema acuífero afectado por la extracción de agua desde pozos profundos.

Identificar sectores en los cuales la información existente es insuficiente o de baja calidad.

Modelo hidrogeológico es diseñado para permitir su posterior actualización a medida que nueva información este disponible



IDENTIFICAR EL PROBLEMA Y FORMULAR OBJETIVOS DE LA MODELACION

Simular flujos de agua subterránea y los procesos de transporte de contaminantes:

- Complementar resultados de monitoreo continuo o muestreos esporádicos.
- Determinar cambios en las condiciones actuales del sistema acuífero (niveles de agua, direcciones de flujo, calidad del agua, entre otros).
- Identificar direcciones de flujo del agua subterránea y tiempos de desplazamiento.
- Predecir movimiento de plumas de contaminación o aumento de zonas contaminadas.



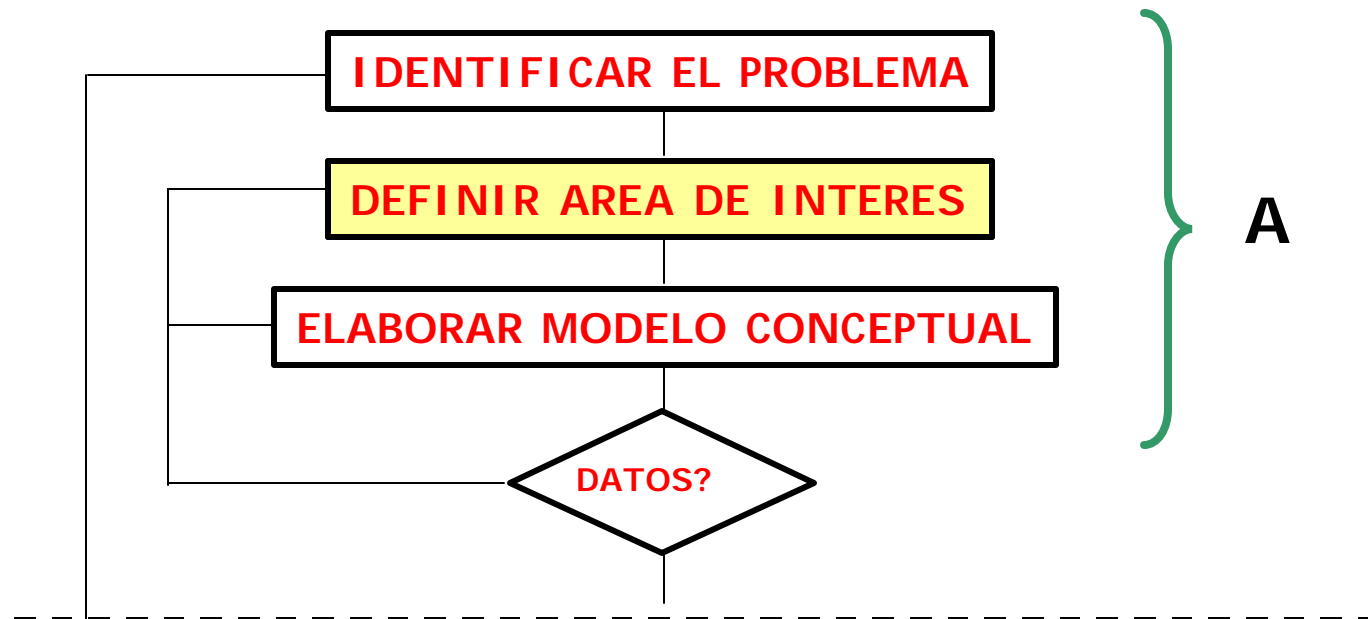
IDENTIFICAR EL PROBLEMA Y FORMULAR OBJETIVOS DE LA MODELACION

Aplicar cambios al sistema natural simulado para evaluar cambios con respecto a una situación futura sin intervención:

- Aumentar tasas de bombeo de pozos existentes.
- Aumentar el número de pozos de bombeo en determinadas zonas.
- Cambio en las condiciones de recarga (urbanización, cambio en sistemas de regadío, revestimiento de canales, entre otros).
- Evaluar el funcionamiento de sistemas de remediación de agua subterránea (bombeo y tratamiento por ejemplo).



ETAPA A: MODELO CONCEPTUAL



DEFINIR AREA DE INTERES PARA LA MODELACION

Identificar la zona de estudio en términos de:

- Su extensión,
- Nivel de información existente,
- Posibles condiciones de borde para efectos de la modelación,
- Usos del suelo pasados, actuales y futuros?
- Actividades industriales de importancia
- Topografía
- Pluviometría
- Geología
- Hidrología e hidrogeología
- Redes de medición o monitoreo (caudales, niveles de agua subterránea, calidad del agua, entre otros).
- Fuentes de recarga



IDENTIFICAR DOMINIO DEL MODELO

Identificar el dominio del modelo dentro de la zona de estudio en términos de:

- Cubrir área suficientemente grande.
- Aprovechar condiciones de borde naturales: lagos, ríos y geología.
- Identificar divisorias de agua
- Identificar posibles zonas de recarga
- No elegir bordes artificiales muy cerca de área de interés.



ZONA DE ESTUDIO

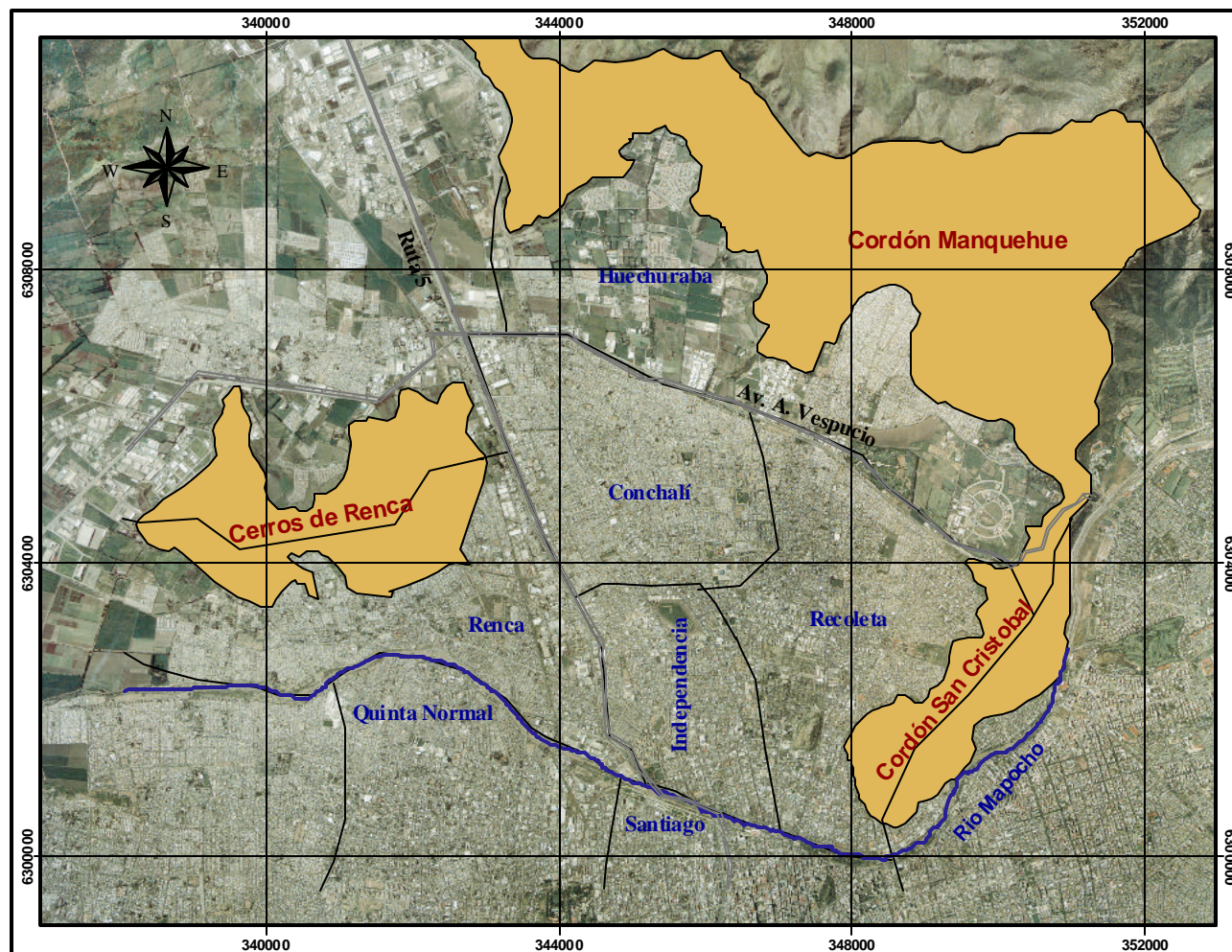
Al discretizar el dominio de modelación (área de estudio) debe destacarse cada "accidente" que afecte la continuidad del sistema representado: ríos y arroyos, canales de drenaje, límites rocosos, etc.

Estos límites pasarán a definir las condiciones de borde del sistema:

- cargas o niveles constantes (un río conectado hidráulicamente con el acuífero),
- carga nula (un borde impermeable que no tiene conexión alguna con el sistema) o
- caudal constante (flujo entrante o saliente, que permanece invariable en un proceso).



ZONA DE ESTUDIO



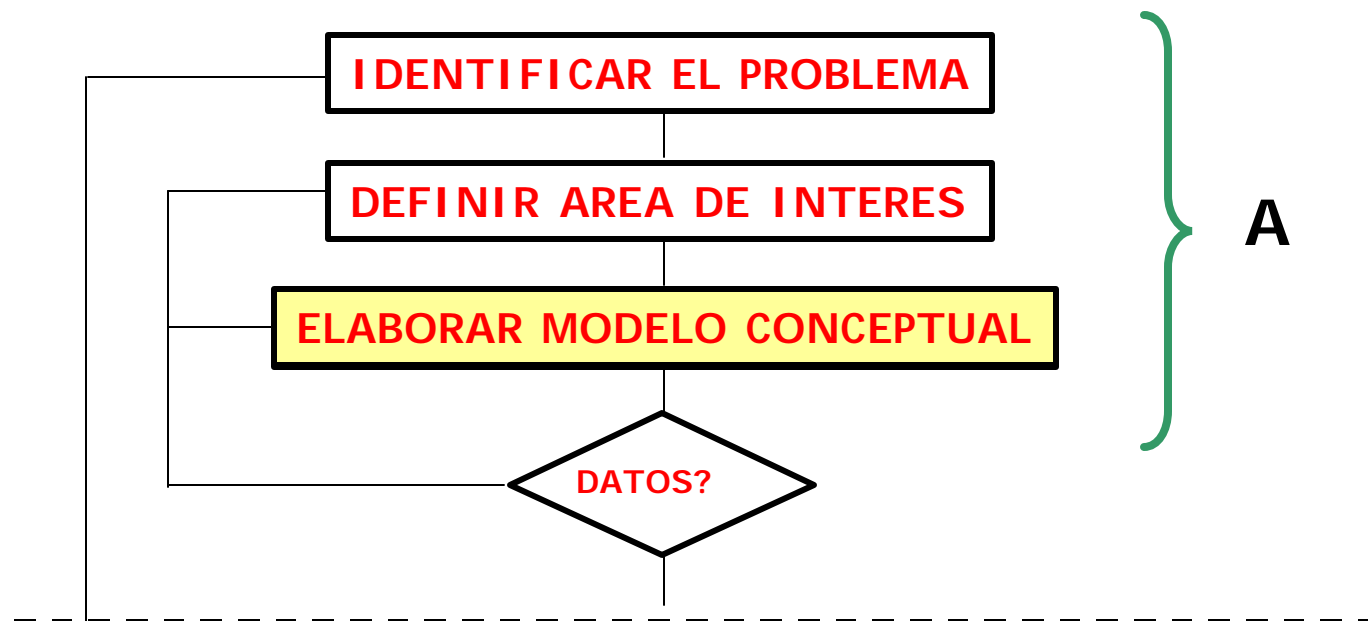
PASO 2





INFORMACION	FUENTE O METODOLOGIA
Datos Generales Zona de Estudio	
Topografía	Mapas
Hidrología (cursos de agua y caudales)	Mapas/Organismos Responsables
Meteorología (Precipitación, viento, radiación solar)	Mapas/Organismos Responsables
Geología/Hidrogeología	Mapas
Datos Específicos Zona de Estudio	
Topografía	Mapas/Mediciones en terreno
Niveles de agua	Mapas/Mediciones en terreno
Geología/Hidrogeología	Mapas/Estudios específicos
Calidad del agua	Mapas/Mediciones en terreno
Datos Subsuperficie	
Propiedades del Suelo/Flujo (K, T, S, Sy, n)	Pruebas de bombeo/Literatura/Estudios de Infiltración
Geología/Litología	Sondajes/Geofísica
Propiedades del Suelo/Transporte (densidad, dispersividad, Kd)	Pruebas de Laboratorio/Pruebas con Trazadores/Literatura
Química de Suelos	Análisis químicos
Niveles de agua	Mapas/Mediciones en terreno/Red de Monitoreo
Características contaminante	Literatura/Datos de Laboratorio/Datos de Terreno

ETAPA A: MODELO CONCEPTUAL



ELABORAR UN MODELO CONCEPTUAL

Un modelo conceptual es una representación simplificada de cómo funciona un sistema real.

Idealización o simplificación de las características conocidas de un lugar para facilitar una aproximación práctica.

Un modelo conceptual se basa en datos de terreno complementados con percepciones de quién esté a cargo de desarrollar este modelo.

Asimismo, el modelo conceptual se relaciona con los objetivos del estudio general que se lleva a cabo.

Un modelo conceptual demuestra la comprensión y conocimiento del sitio de estudio por parte del "modelador".



ELABORAR UN MODELO CONCEPTUAL

Información básica para desarrollar un modelo conceptual:

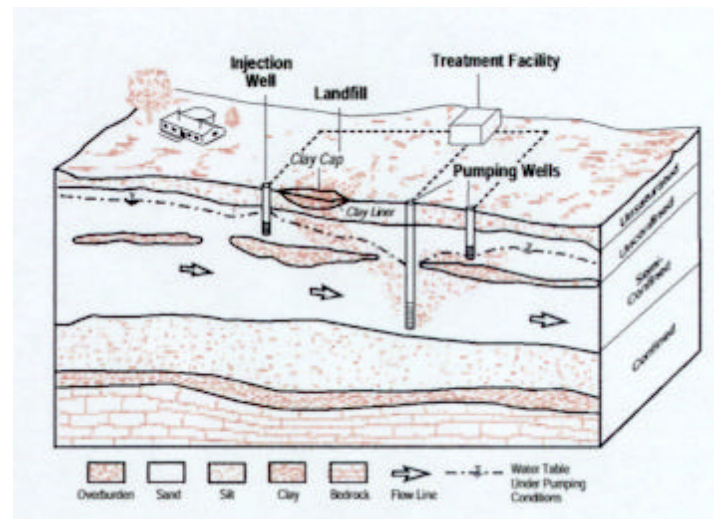
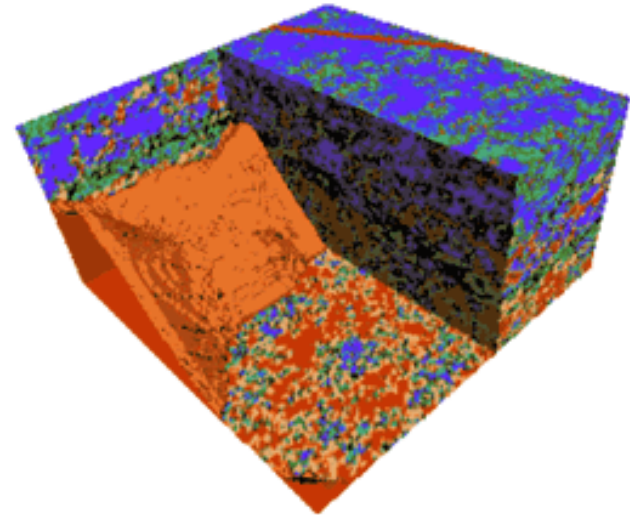
- Descripción del sitio y su historia
- Caracterización geológica del sitio
- Caracterización de la hidrología y clima
- Caracterización de la hidrogeología
- Características de fuentes de contaminación
- Vías preferenciales de contaminación
- Características de migración de contaminantes
- Receptores
- Características litológicas de interés
- Comportamiento observado de contaminantes
- Ambiente biogeoquímico
- Incertezas



ELABORAR UN MODELO CONCEPTUAL

Modelo de Flujo:

- Número de estratos o capas
- Flujos verticales? (2D vs 3D)?
- Características del suelo
- Recarga/evapotranspiración
- Condiciones iniciales
- Zonas uniformes?
- Uso del suelo?



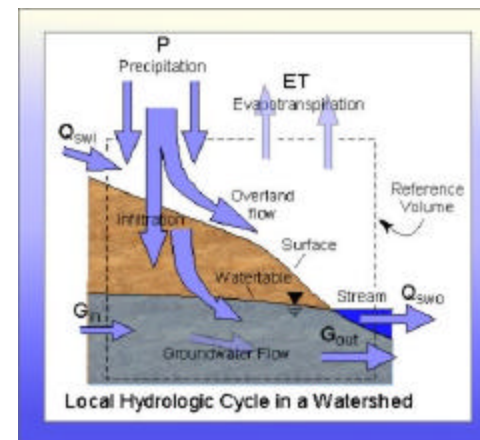
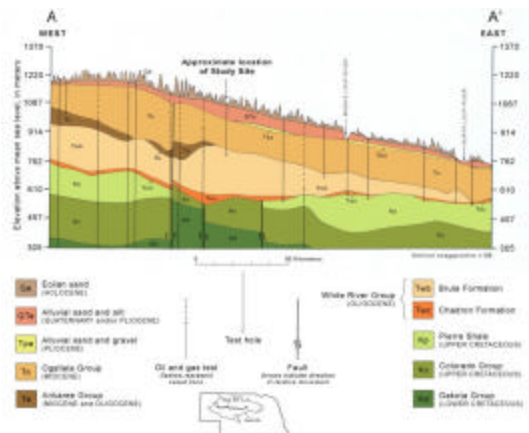
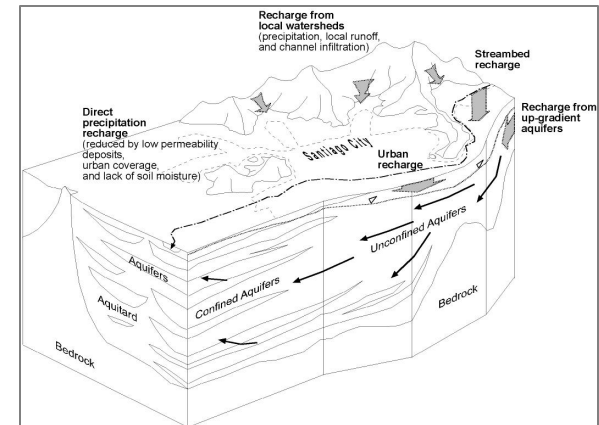
PASO 3



ELABORAR UN MODELO CONCEPTUAL

Componentes de un modelo conceptual:

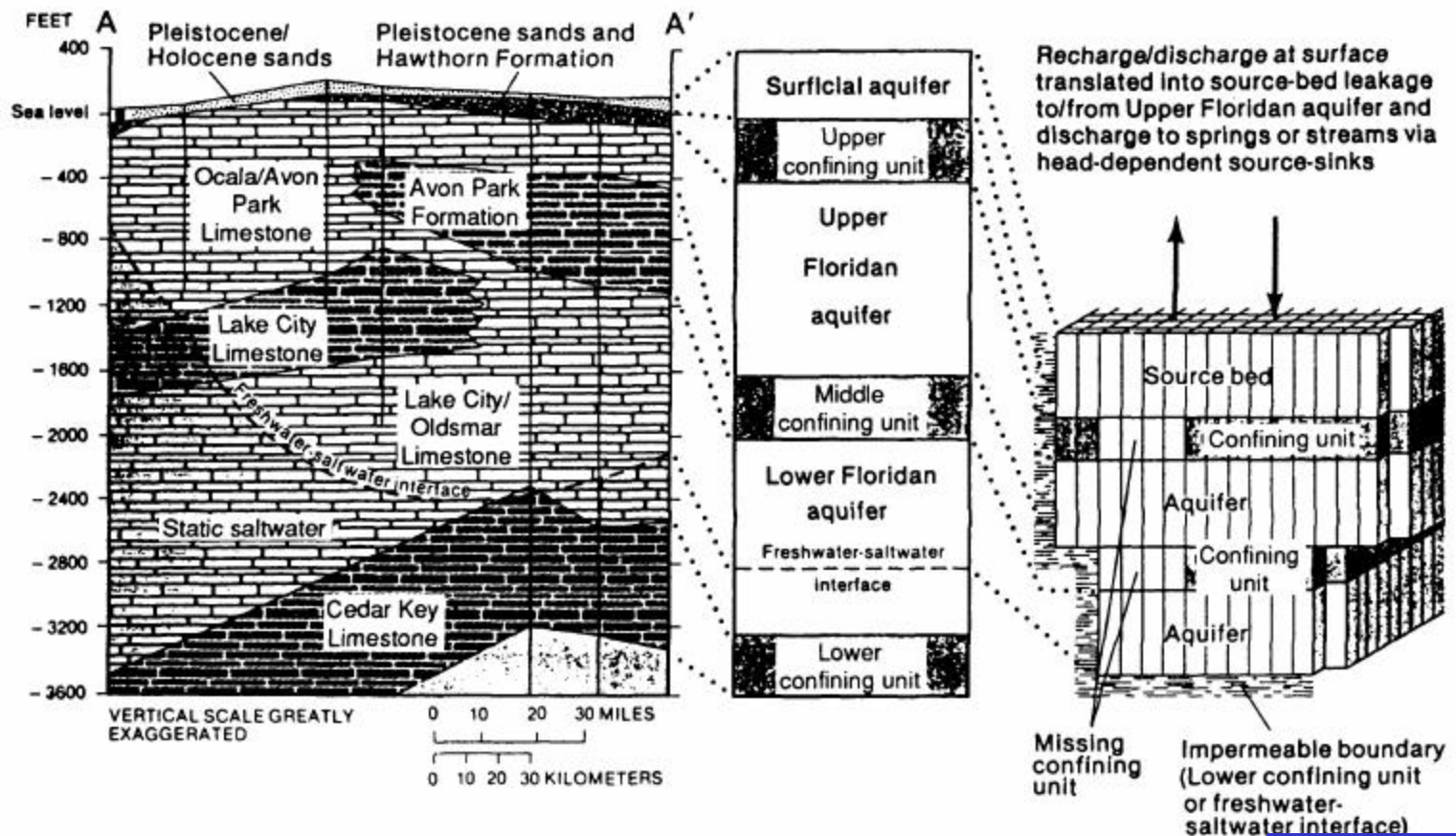
- Unidades hidrogeológicas
- Balance de aguas (balance hídrico)
- Sistema de flujo



PASO 3

ELABORAR UN MODELO CONCEPTUAL

Unidades Hidrogeológicas:

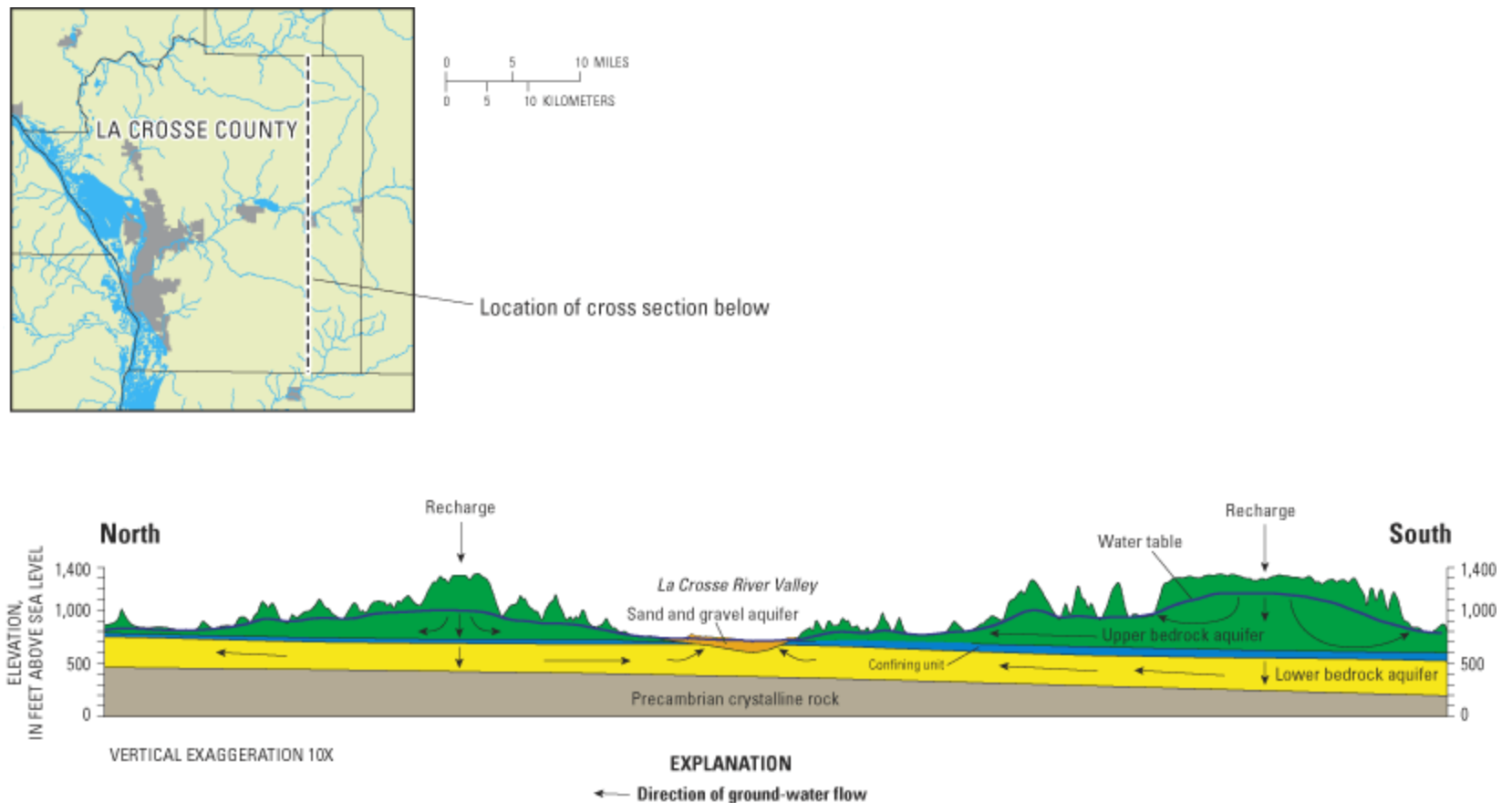


PASO 3



ELABORAR UN MODELO CONCEPTUAL

Unidades Hidrogeológicas:



PASO 3

ELABORAR UN MODELO CONCEPTUAL

Unidades Hidrogeológicas:

	GEOLOGIC UNITS (Evans, 2003)	HYDROSTRATIGRAPHIC UNITS (Chapel and others, 2003a)	USGS LA CROSSE COUNTY MODEL UNITS (this report)
QUATER- NARY	Unlithified valley fill	Sand and gravel aquifer	Sand and gravel aquifer
	Oneota Formation Average thickness ~ 130 ft	Ridge-top aquifer system	Upper bedrock aquifer (layer 1)
ORDOVICIAN	Jordan Formation Average thickness ~ 75 ft		
	St. Lawrence Formation Average thickness ~ 50 ft		
	Lone Rock Formation Average thickness ~ 150 ft		
	Wonewoc Formation Average thickness ~ 200 ft	Wonewoc aquifer	
	Shaly facies of Eau Claire Formation	Eau Claire aquitard	Eau Claire aquitards (layer 2)
Sandy facies of Eau Claire Formation			
CAMBRIAN	Sandy facies of Eau Claire Formation	Mount Simon aquifer	Lower bedrock aquifer (layer 3)
	Mount Simon Formation Average thickness ~ 300 ft		
	Precambrian granite	Aquitard	Aquitard

PASO 3



ELABORAR UN MODELO CONCEPTUAL

Balance Hídrico:

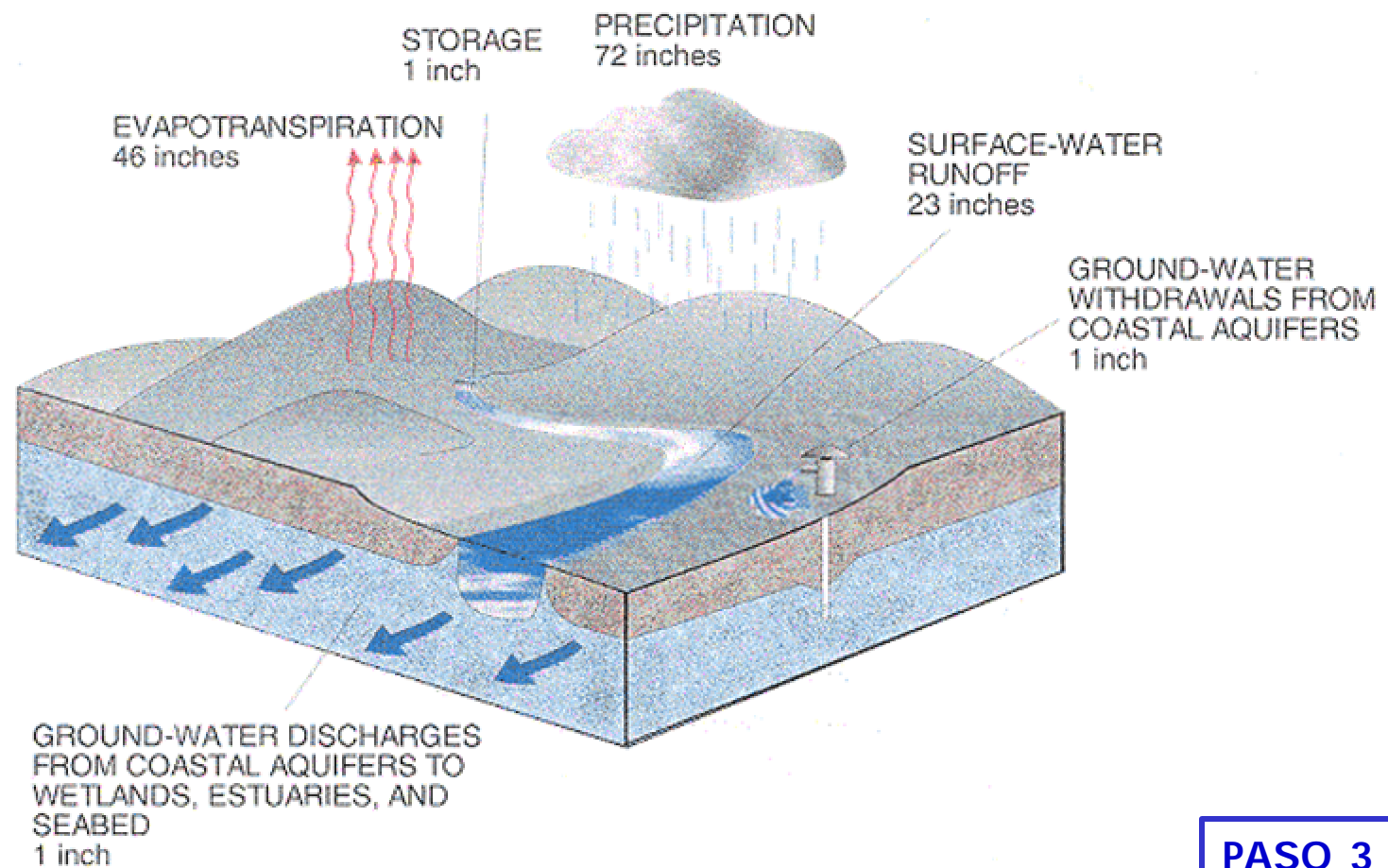
Parte muy relevante de un modelo conceptual es disponer de un balance hídrico en el que se incluyan todos los flujos de entrada y salida al sistema modelado.

Para el modelo conceptual es importante disponer de valores globales en el caso de considerar una modelación en régimen permanente y valores estacionales (diarios, semanales, mensuales, trimestrales, semestrales) según sea el tipo de modelación transiente que se considera.



ELABORAR UN MODELO CONCEPTUAL

Balance Hídrico:

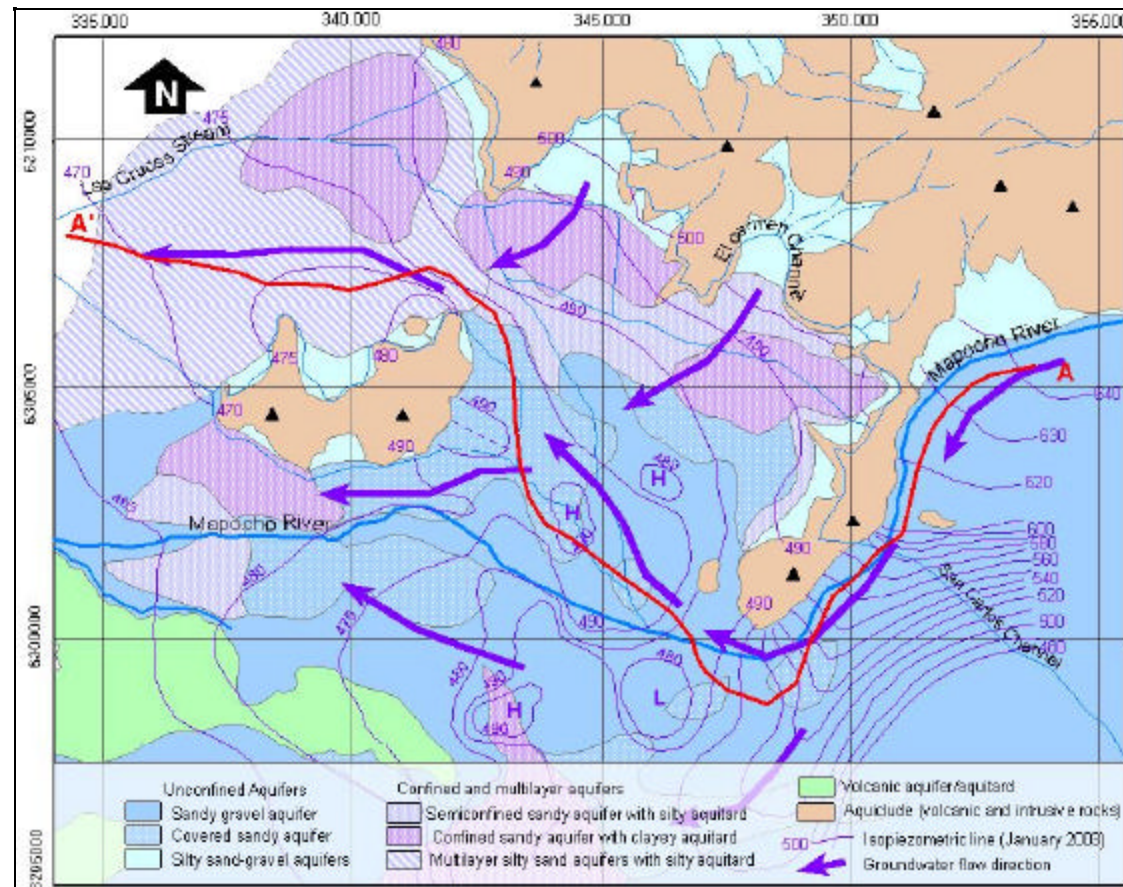


PASO 3



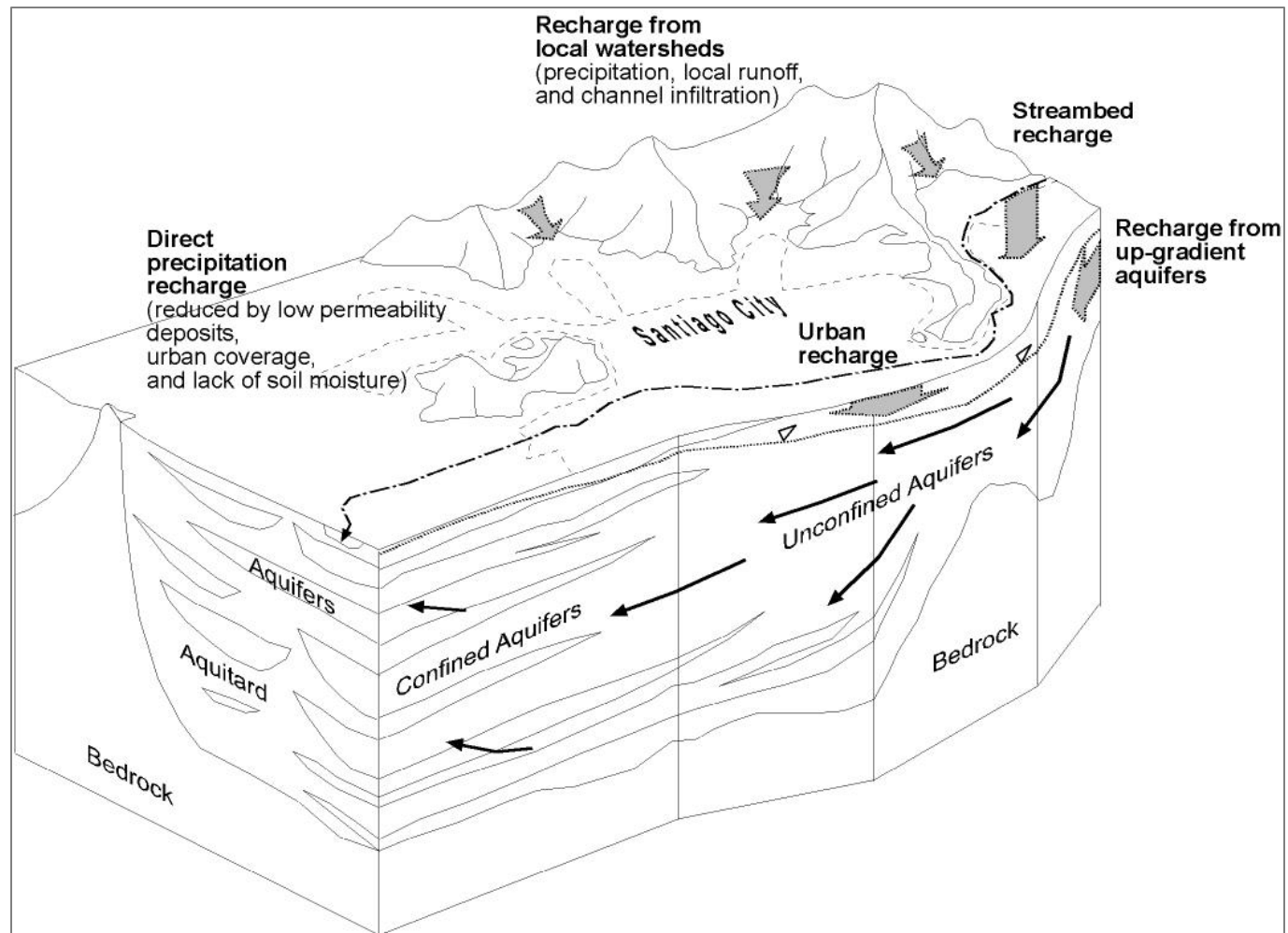
ELABORAR UN MODELO CONCEPTUAL

Sistema de Flujo:

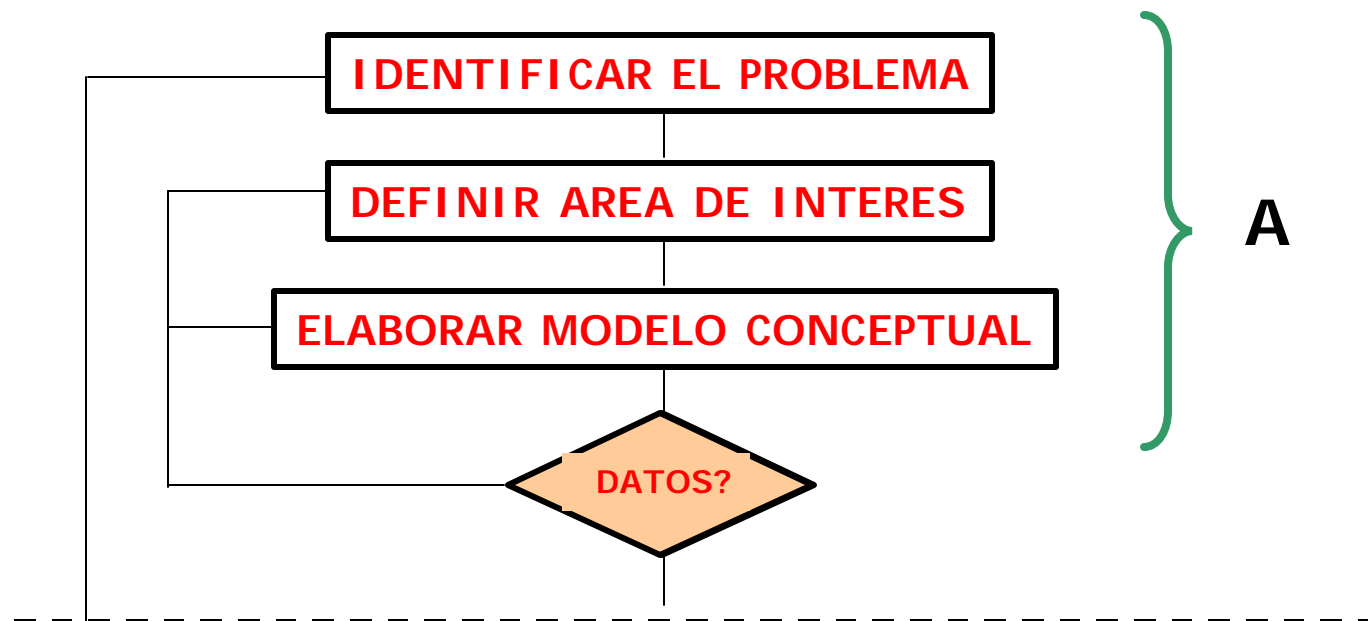


PASO 3

ELABORAR UN MODELO CONCEPTUAL



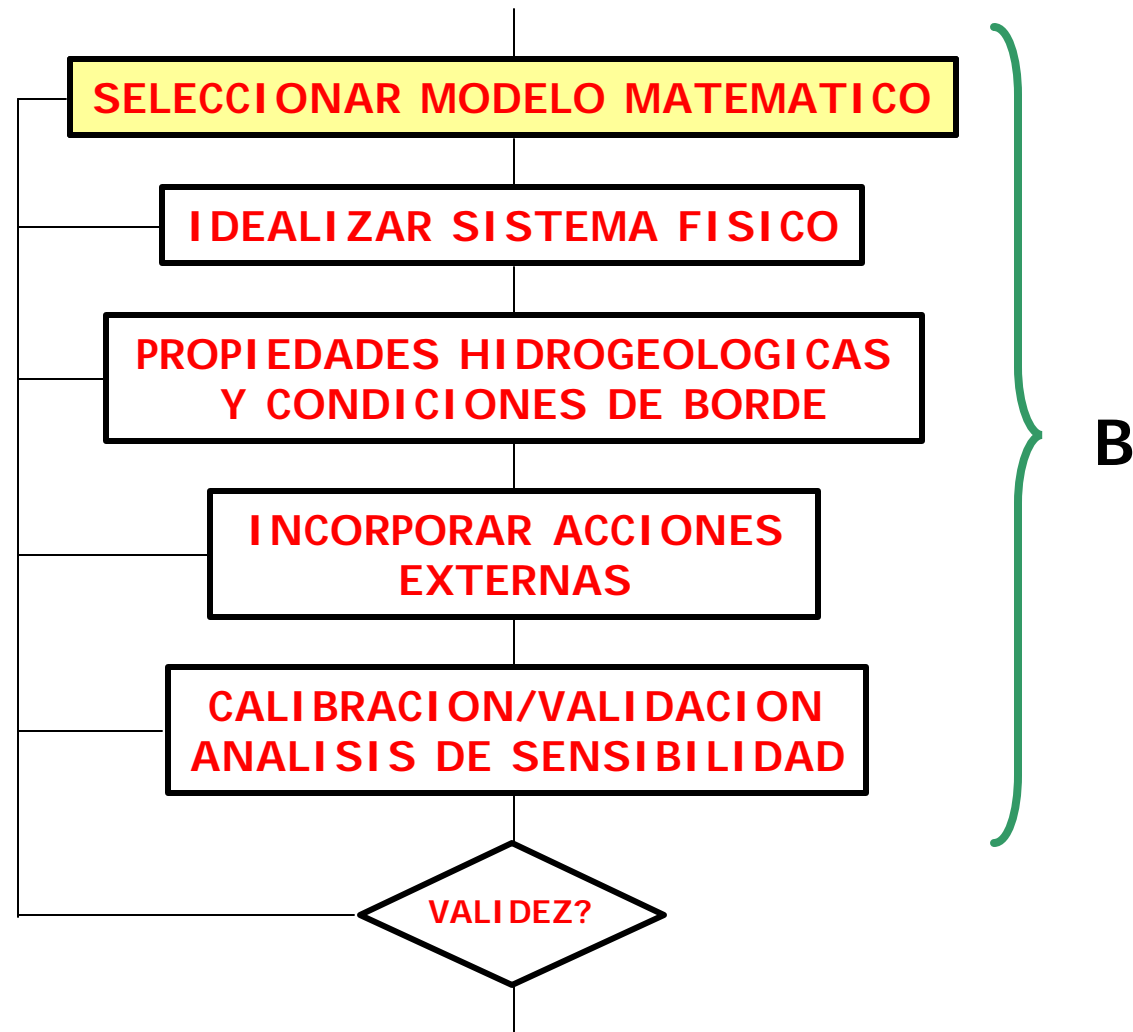
ETAPA A: MODELO CONCEPTUAL



- **INTRODUCCION**
- **ETAPAS EN LA CONSTRUCCION DE UN MODELO DE SIMULACION HIDROGEOLOGICO**
 - **ETAPA A: MODELO CONCEPTUAL**
 - **ETAPA B: MODELO HIDROGEOLOGICO**
 - **ETAPA C: USO Y POSTAUDITORIA**
- **CONCLUSIONES**

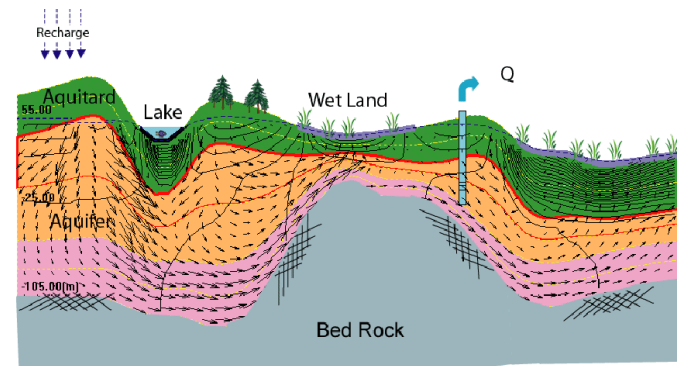
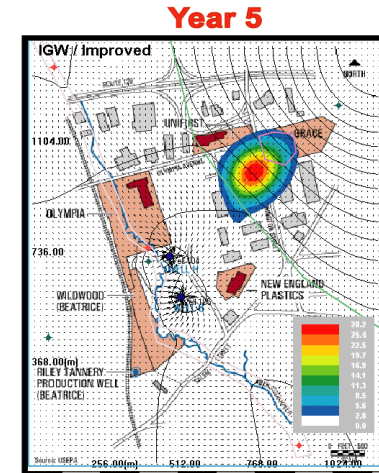


ETAPA B: MODELO HIDROGEOLOGICO



SELECCIONAR MODELO MATEMATICO

- 1-D, 2-D, o 3-D?
- Transiente o régimen permanente?
- Flujo o transporte?
- Compuestos disueltos, fase líquida o gaseosa?
- Modelo predictivo o inverso?
- Se requiere algún programa específico o genérico?
- Experiencia y confianza del usuario?
- Soporte técnico?
- Capacidades de pre y post proceso?
- Presupuesto y tiempo disponible?

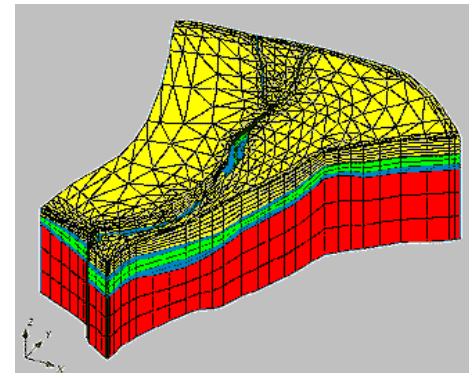


PASO 4



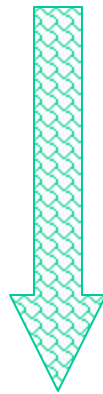
SELECCIONAR MODELO MATEMATICO

- Identificar necesidades o requerimientos
- Tipos de modelos disponibles
- Métodos de solución
- Referencias del código o modelo
- Pre y post procesadores



SELECCIONAR MODELO MATEMATICO

IDENTIFICAR NECESIDADES O REQUERIMIENTOS



Objetivos de modelación

Modelos conceptual

Presupuesto

Tiempo

**DISCRETIZACION:
SIMPLE O COMPLEJA?**

1D, 2D o 3D?

**LIBRE, CONFINADO,
SEMICONFINADO?**

**SATURADO O
NO SATURADO?**

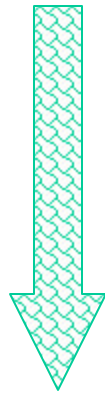
**DETERMINISTICO O
ESTOCASTICO?**

PASO 4



SELECCIONAR MODELO MATEMATICO

TIPOS DE MODELOS DISPONIBLES



○ Basados en objetivos

○ Basados en procesos

○ Basados en características físicas del sistema

○ Características matemáticas

DISEÑO DE CAMPO DE POZOS?
ESTIMACION DE PARAMETROS?

FLUJO SATURADO O NO SATURADO?
TRANSPORTE DE CONTAMINANTES?

1D, 2D, O 3D?
ANALITICO, NUMERICO, EMPIRICO?
DETERMINISTICO O ESTOCASTICO?

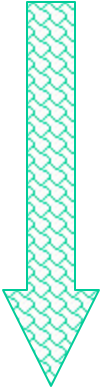
LIBRE, CONFINADO,
SEMICONFINADO?
MEDIO FRACTURADO?

PASO 4



SELECCIONAR MODELO MATEMATICO

METODOS DE SOLUCION

- 
- Analíticos
 - Elementos Finitos
 - Diferencias Finitas
 - Otros

**ENFOQUES MATEMATICOS
TRADICIONALES Y SIMPLES.**

**HOMOGENEIDAD
1D O 2D**

**RESUELVE ECUACIONES DIFERENCIALES
A TRAVES DE APROXIMACIONES
ALGEBRAICAS NATURALES**

MODFLOW, MT3D, RT3D

**USO DE FUNCIONES BASES QUE
PERMITEN OBTENER SOLUCIONES
EXACTAS EN NUDOS ADYACENTES.**

FEMWATER, FEFLOW.

VOLUMENES FINITOS

SEMIANALITICOS

PASO 4



SELECCIONAR MODELO MATEMATICO

REFERENCIAS DEL CODIGO



○ Capacidades

○ Atributos

CENTROS DE REFERENCIA

IGWMC

USEPA

USGS

NGWA



SELECCIONAR MODELO MATEMATICO

PRE Y POST PROCESO

- Interfaces gráficas
- Manejo de información
- Generación automática de mallas



ANIMACION DE RESULTADOS DE
MODELACION

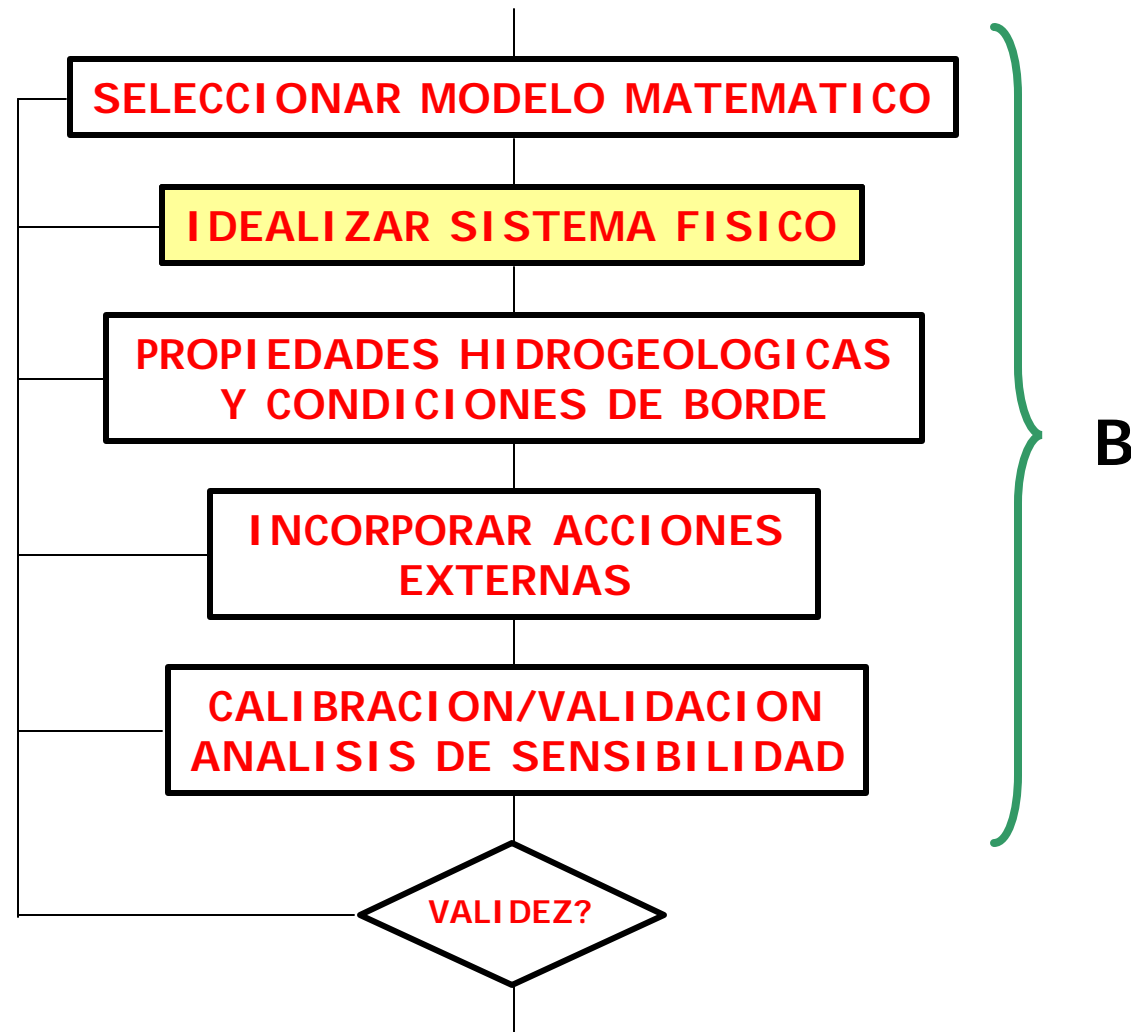
DISPONIBILIDAD EN PLATAFORMAS
WINDOWS, MAC, Y UNIX

CARTOGRAFIA DIGITAL

PASO 4



ETAPA B: MODELO HIDROGEOLOGICO



IDEALIZAR SISTEMA FISICO

- DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO ESPACIAL

- DISCRETIZACIÓN DE MALLA EN LA DIRECCIÓN VERTICAL

- SELECCIONAR TIEMPO MÁXIMO DE SIMULACIÓN

- SELECCIONAR TIEMPO PARA INICIO DE SIMULACIÓN TRANSIENTE

- SELECCIONAR INTERVALO DE TIEMPO PARA SIMULACIÓN.

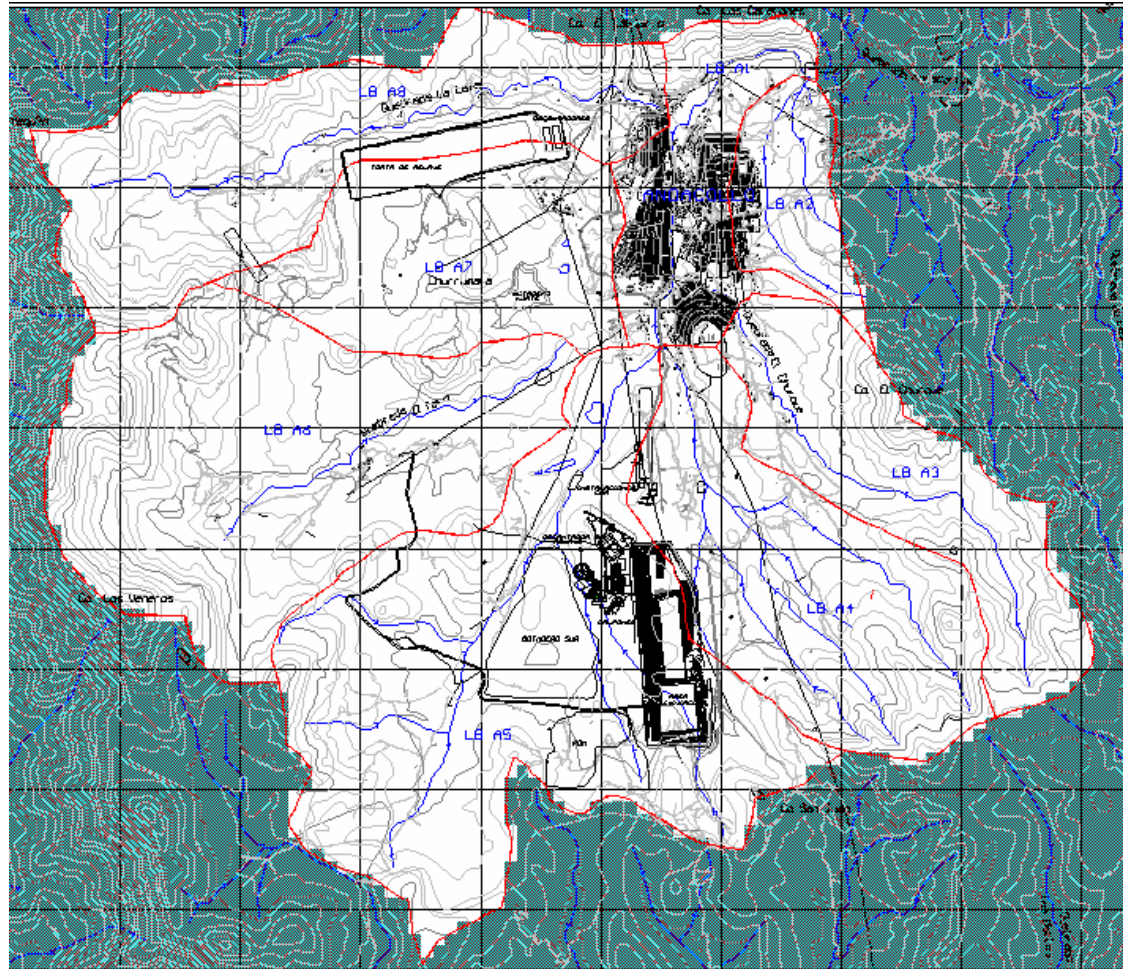


IDEALIZAR SISTEMA FISICO

- Definir malla inicial uniforme.
- Malla más fina en áreas de mayor gradiente y en zonas de interés.
- Transición suave entre áreas finas y gruesas.
- Alta precisión = Solución lenta.
- Incrementar resolución del modelo.
- Minimizar requerimientos de computación.
- Orientar malla en la dirección del flujo principal.
- Estabilidad del modelo es mejor con espaciamientos uniformes.



IDEALIZAR SISTEMA FISICO

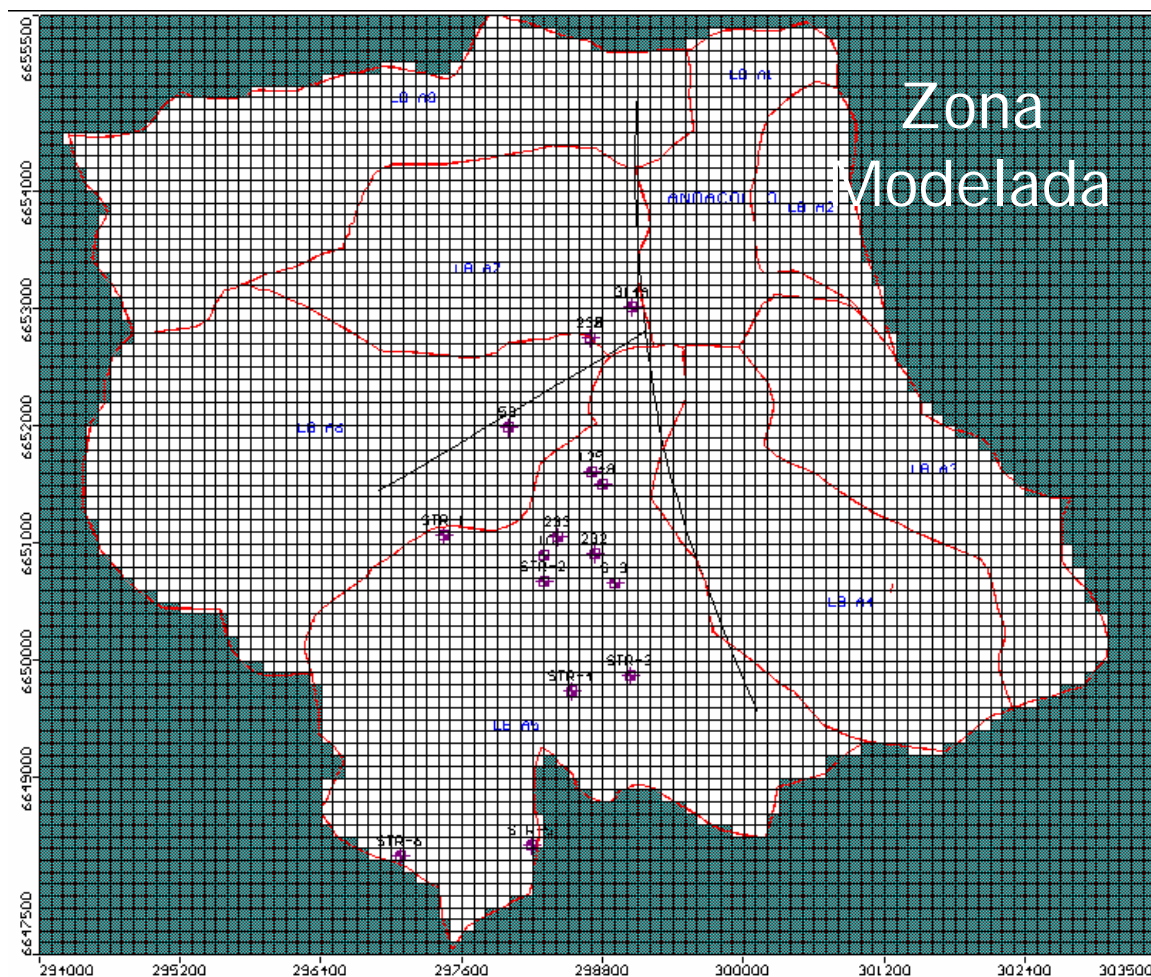


DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO ESPACIAL

PASO 5



IDEALIZAR SISTEMA FISICO

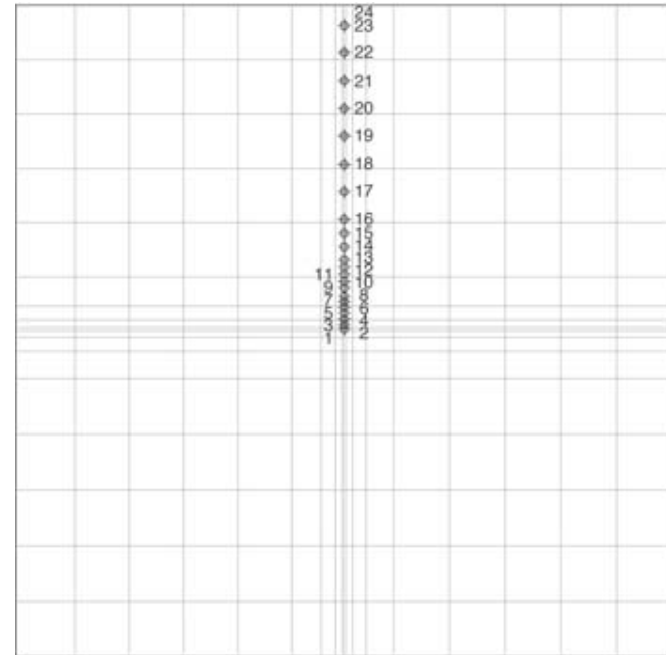
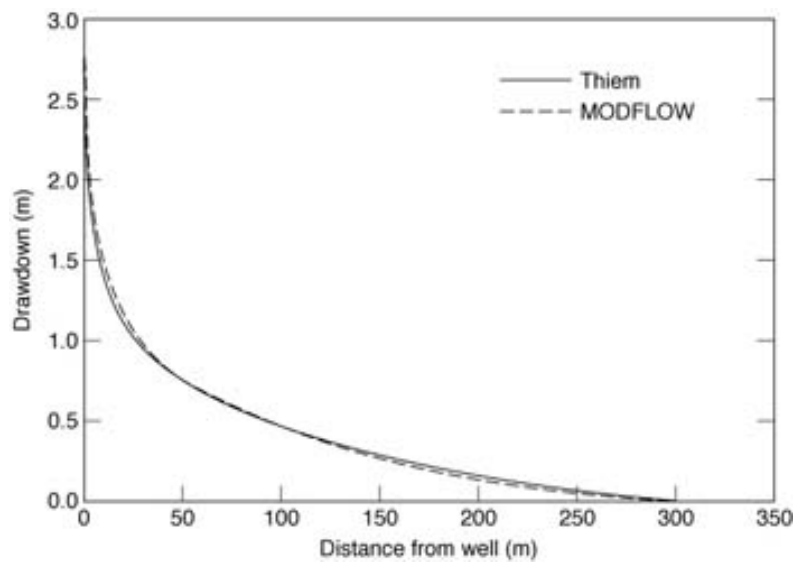


DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO ESPACIAL

PASO 5



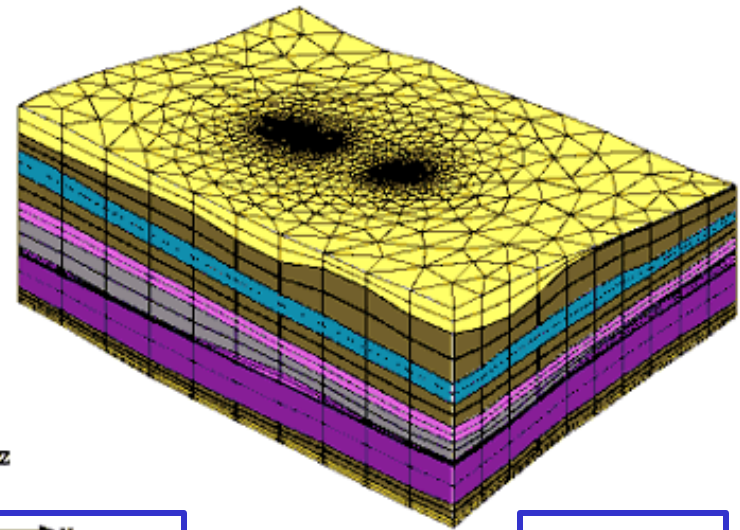
IDEALIZAR SISTEMA FISICO



DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO ESPACIAL

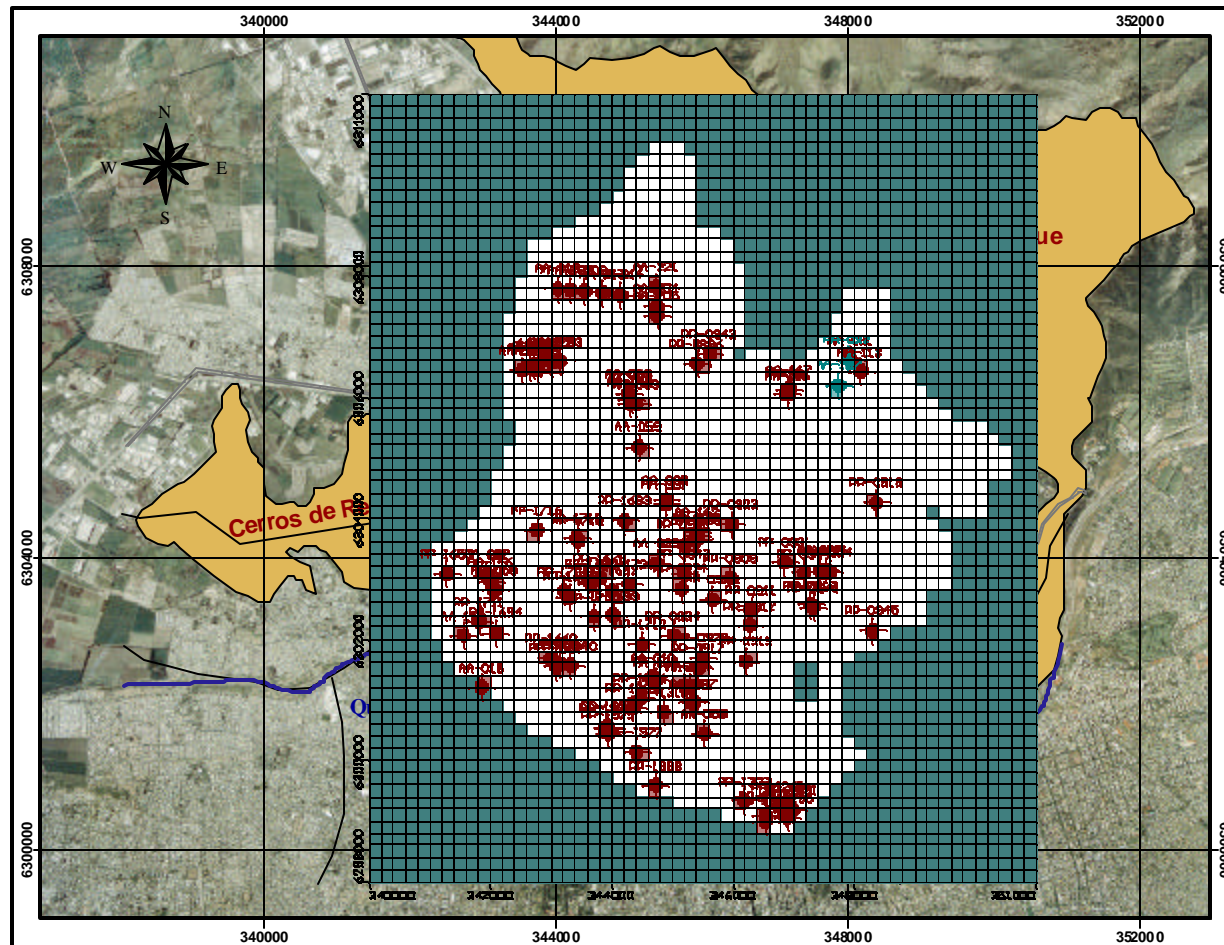
PASO 5





PASO 5

IDEALIZAR SISTEMA FISICO

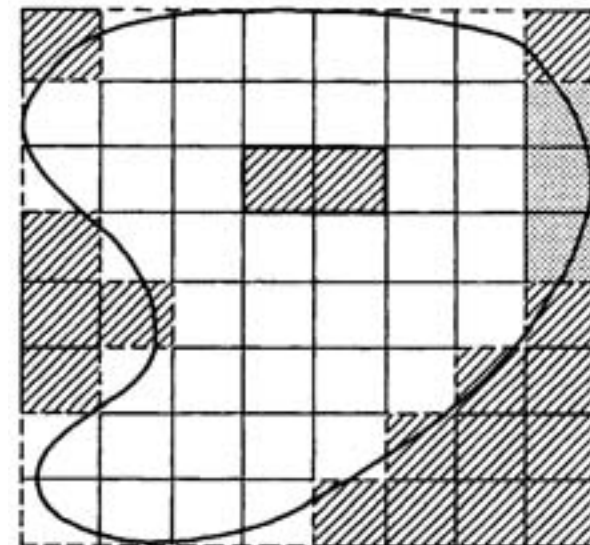
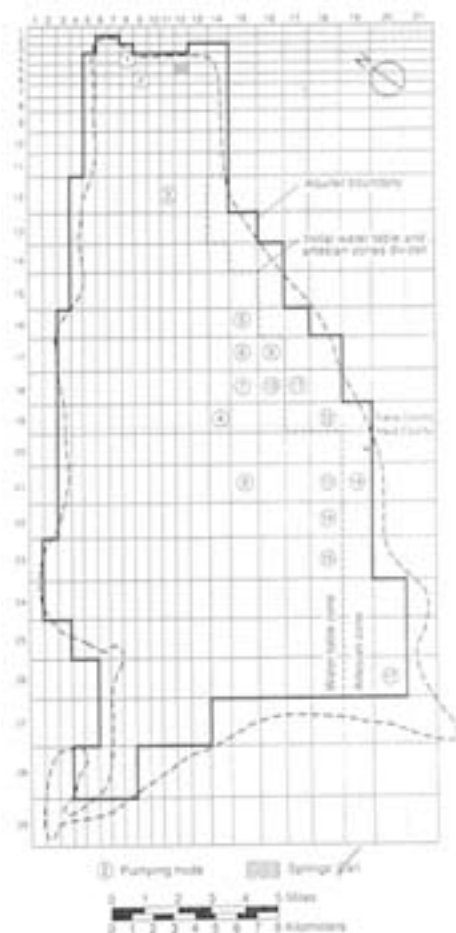


DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO ESPACIAL

PASO 5



IDEALIZAR SISTEMA FISICO



Explanation

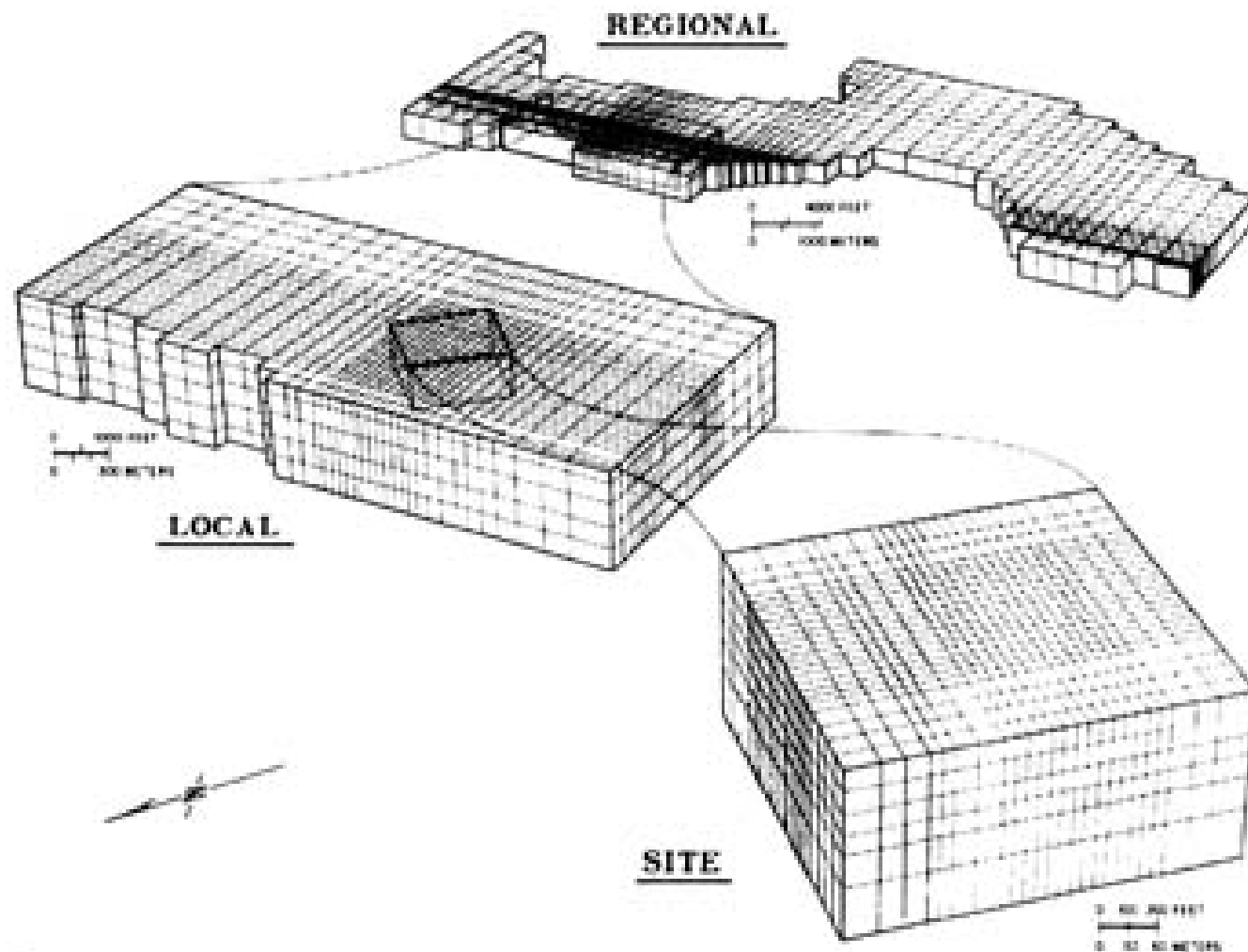
- Aquifer Boundary
- - - Model Impermeable Boundary
- ▨ Inactive Cell
- ▩ Constant-Head Cell
- Variable-Head Cell

DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO ESPACIAL

PASO 5



IDEALIZAR SISTEMA FISICO

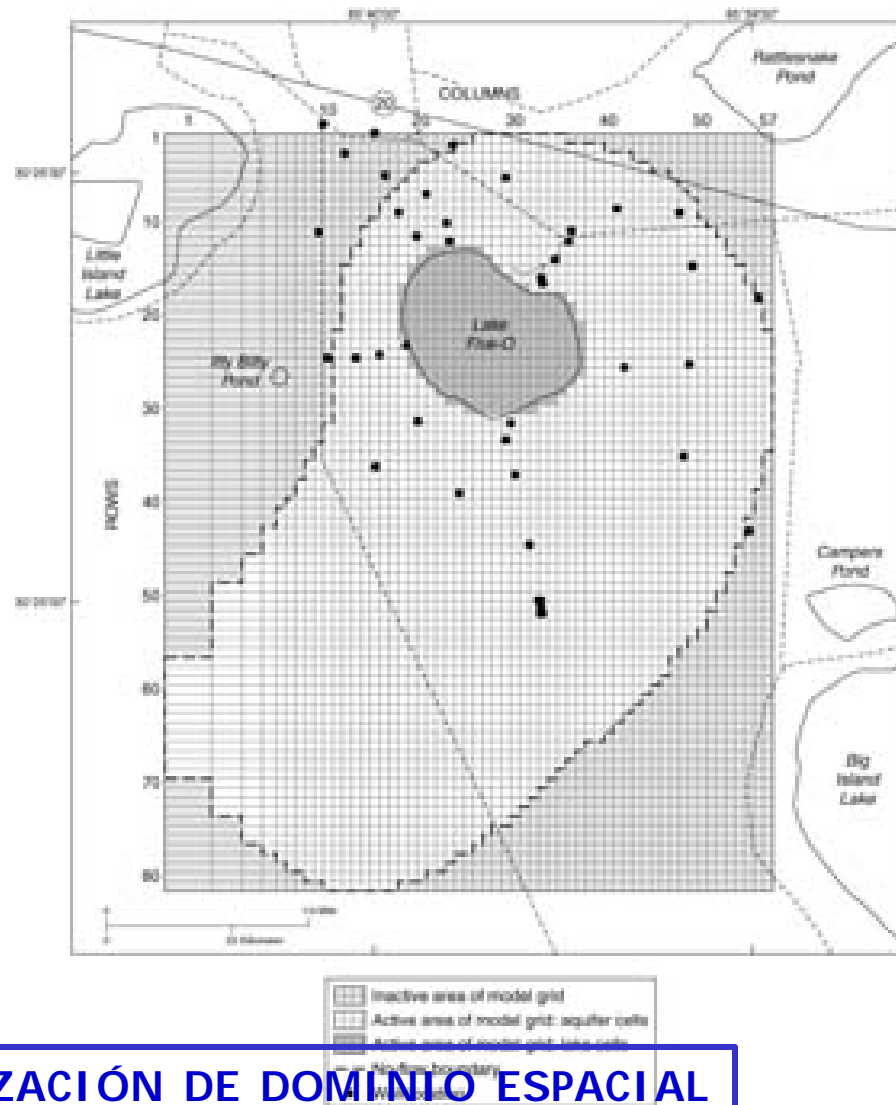


DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO ESPACIAL

PASO 5



IDEALIZAR SISTEMA FISICO



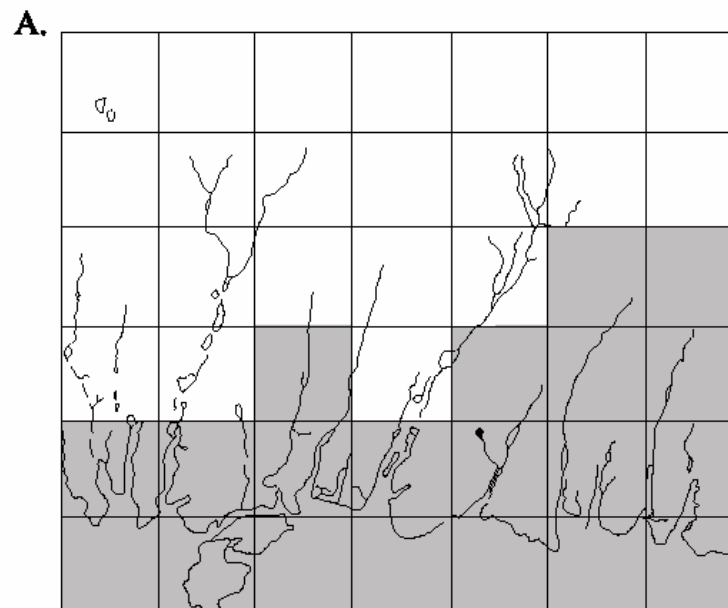
DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO ESPACIAL

PASO 5



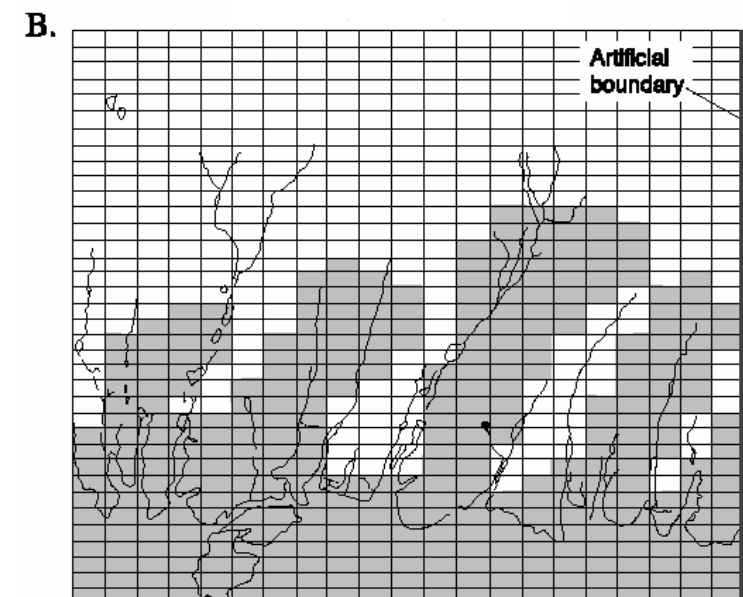
IDEALIZAR SISTEMA FISICO

REGIONAL



0 6,000 12,000 FEET
0 1,820 3,640 METERS

SUB-REGIONAL



EXPLANATION

■ EXTENT OF CLAY AREA

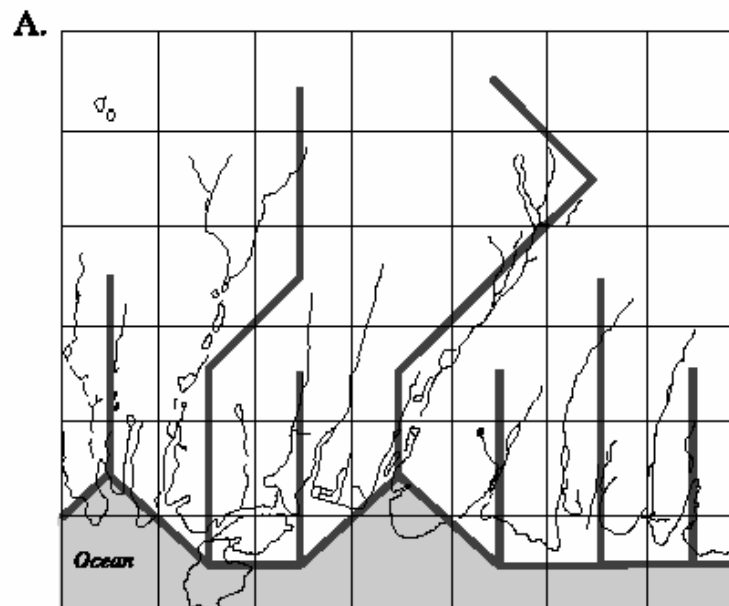
DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO ESPACIAL

PASO 5



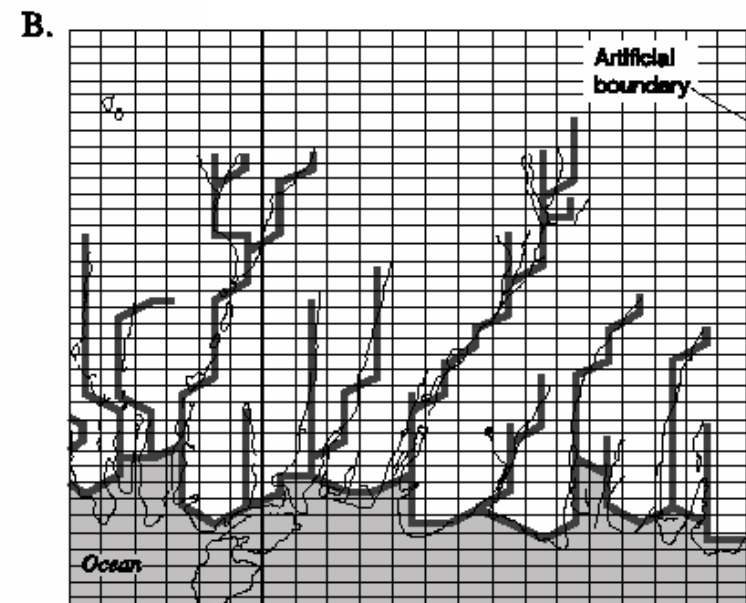
IDEALIZAR SISTEMA FISICO

REGIONAL



0 6,000 12,000 FEET
0 1,820 3,640 METERS

SUB-REGIONAL



EXPLANATION

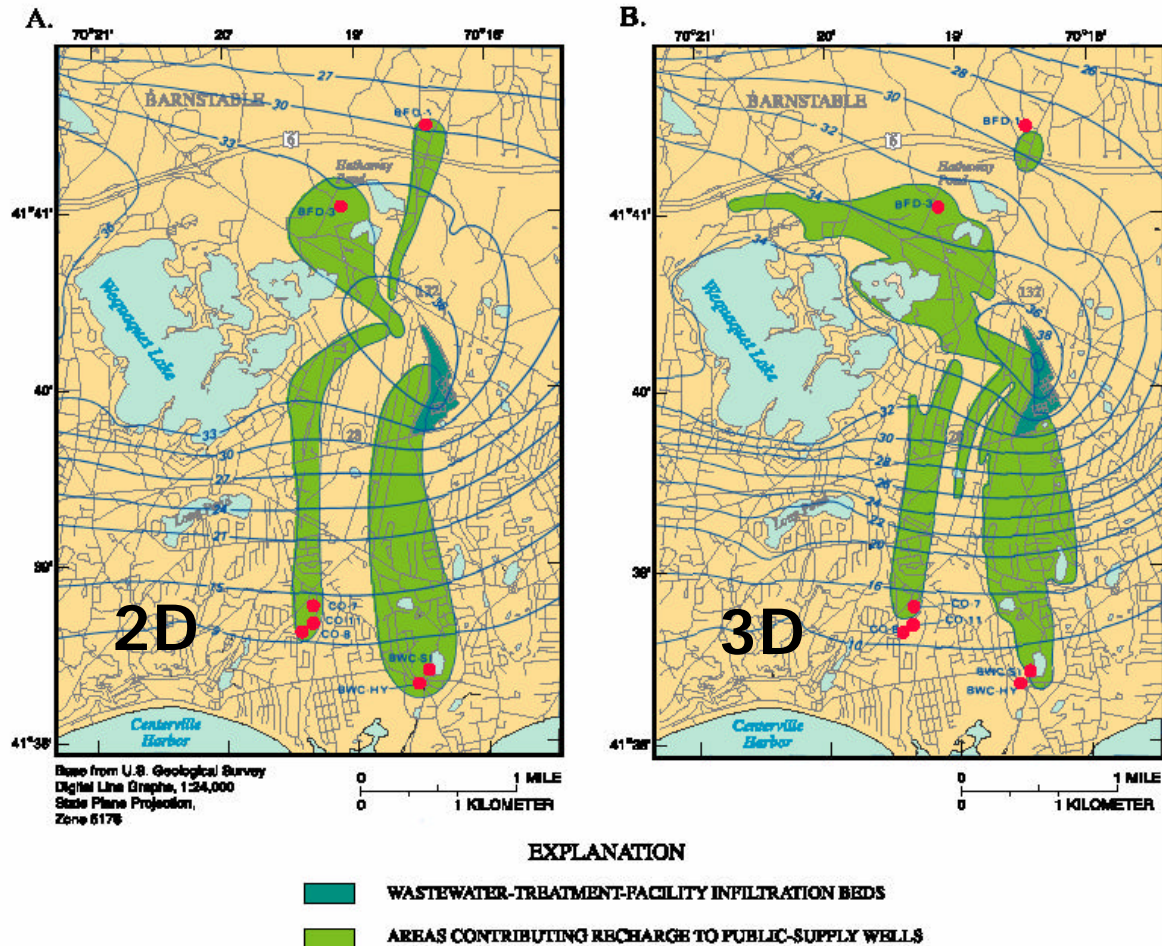
■ EXTENT OF CLAY AREA

DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO ESPACIAL

PASO 5



IDEALIZAR SISTEMA FISICO



DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO ESPACIAL

PASO 5



IDEALIZAR SISTEMA FISICO

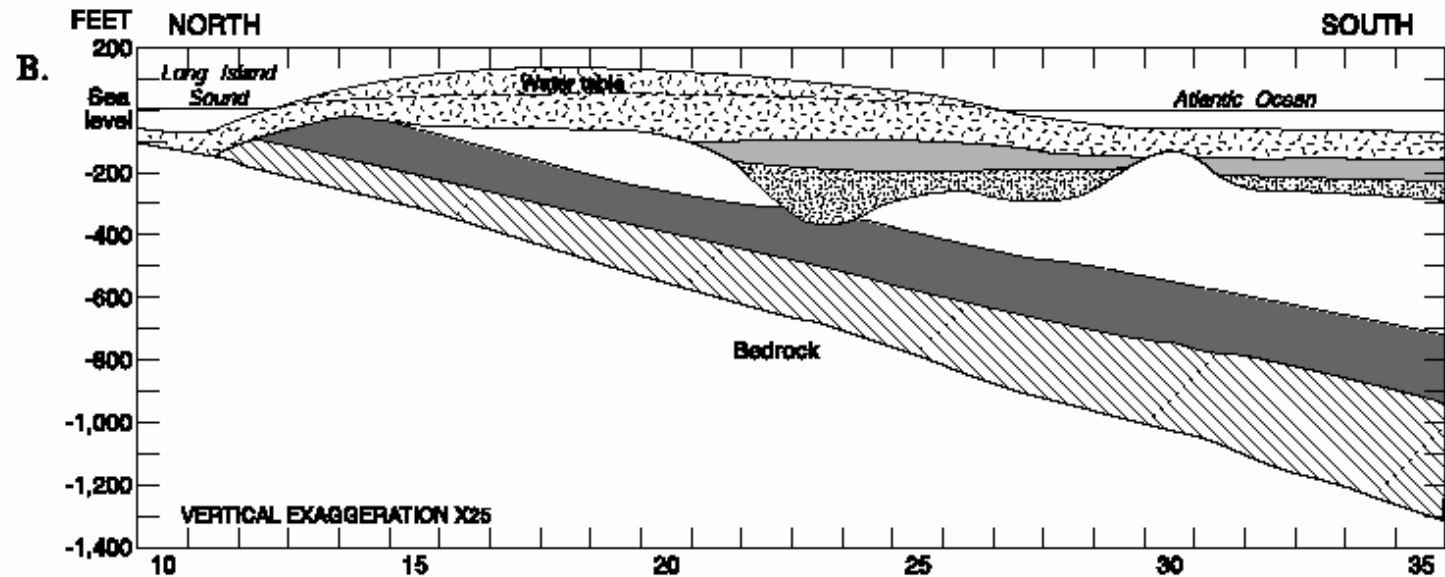
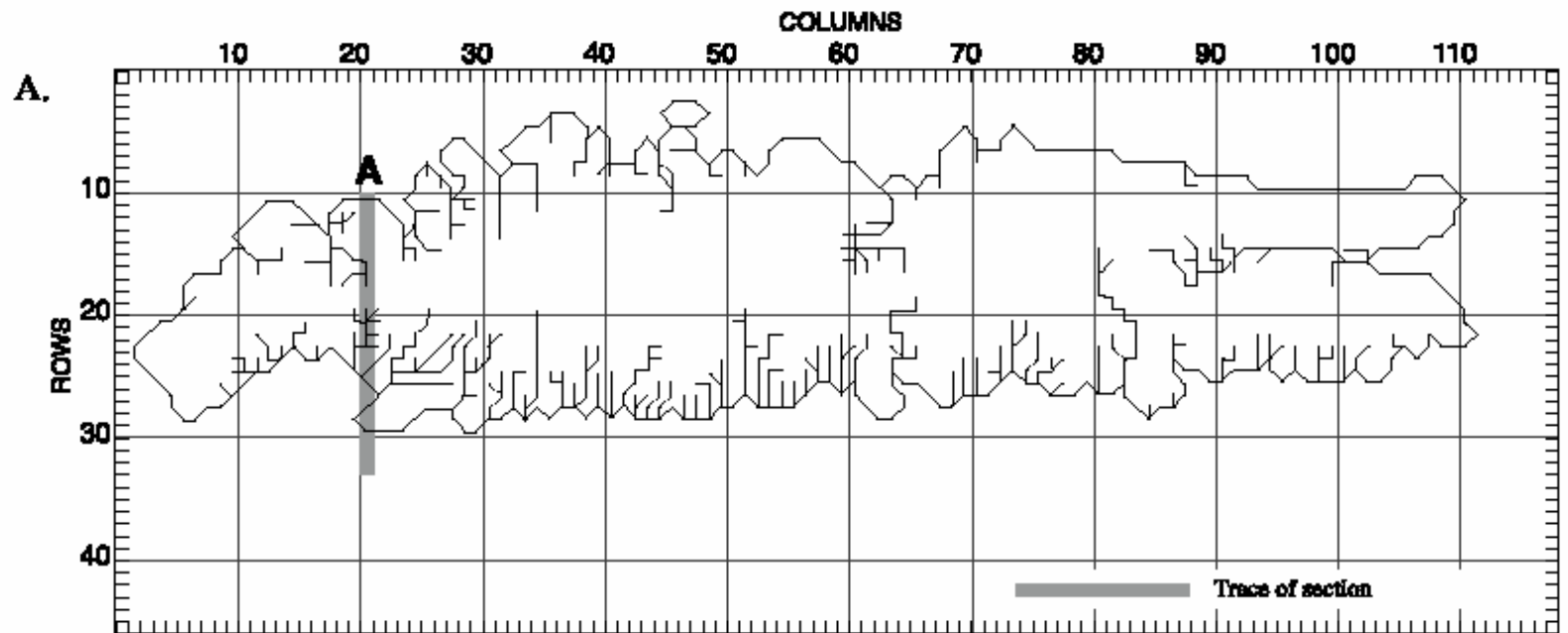
- DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO ESPACIAL
- DISCRETIZACIÓN DE MALLA EN LA DIRECCIÓN VERTICAL
- SELECCIONAR TIEMPO MÁXIMO DE SIMULACIÓN
- SELECCIONAR TIEMPO PARA INICIO DE SIMULACIÓN TRANSIENTE
- SELECCIONAR INTERVALO DE TIEMPO PARA SIMULACIÓN.



IDEALIZAR SISTEMA FISICO

- Discretización de malla en la dirección vertical
 - Alternativas de malla deforme o malla fija.
 - Malla deforme implica menor número de estratos verticales.
 - Malla fija respeta los supuestos de diferencias finitas
- Elevaciones de fondo (basamento) y topografía pueden ser importadas desde archivos en ASCII o SURFER.
- Mayor número de estratos permite reproducir mejor el modelo conceptual, pero aumentan los requerimientos computacionales.

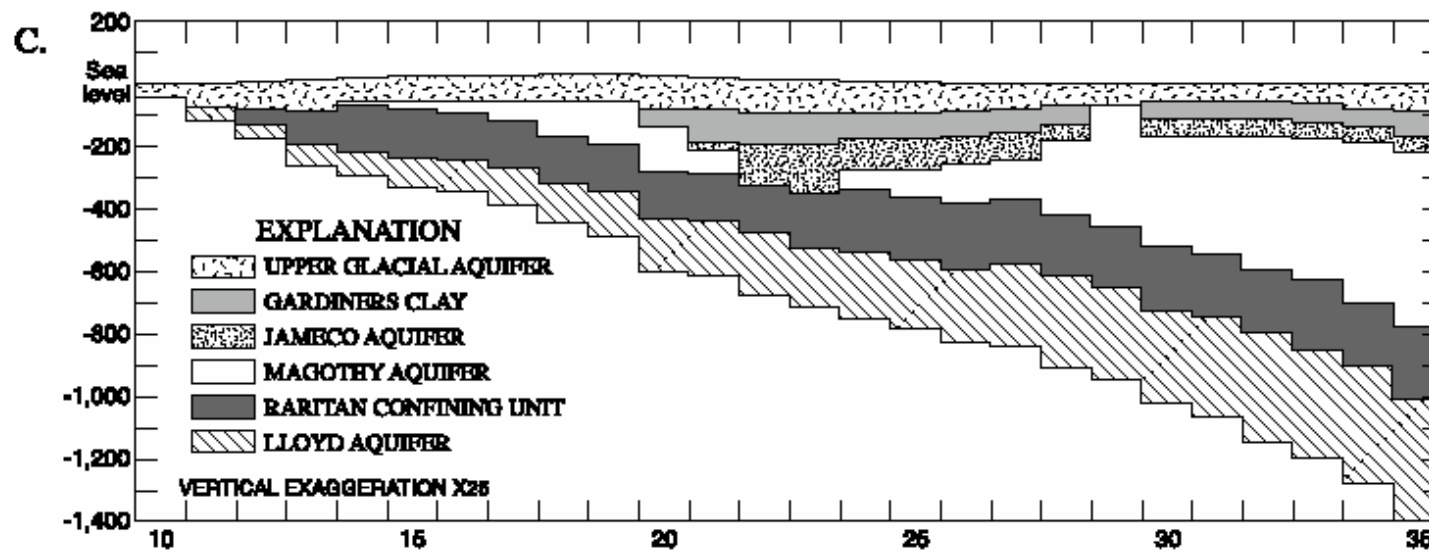
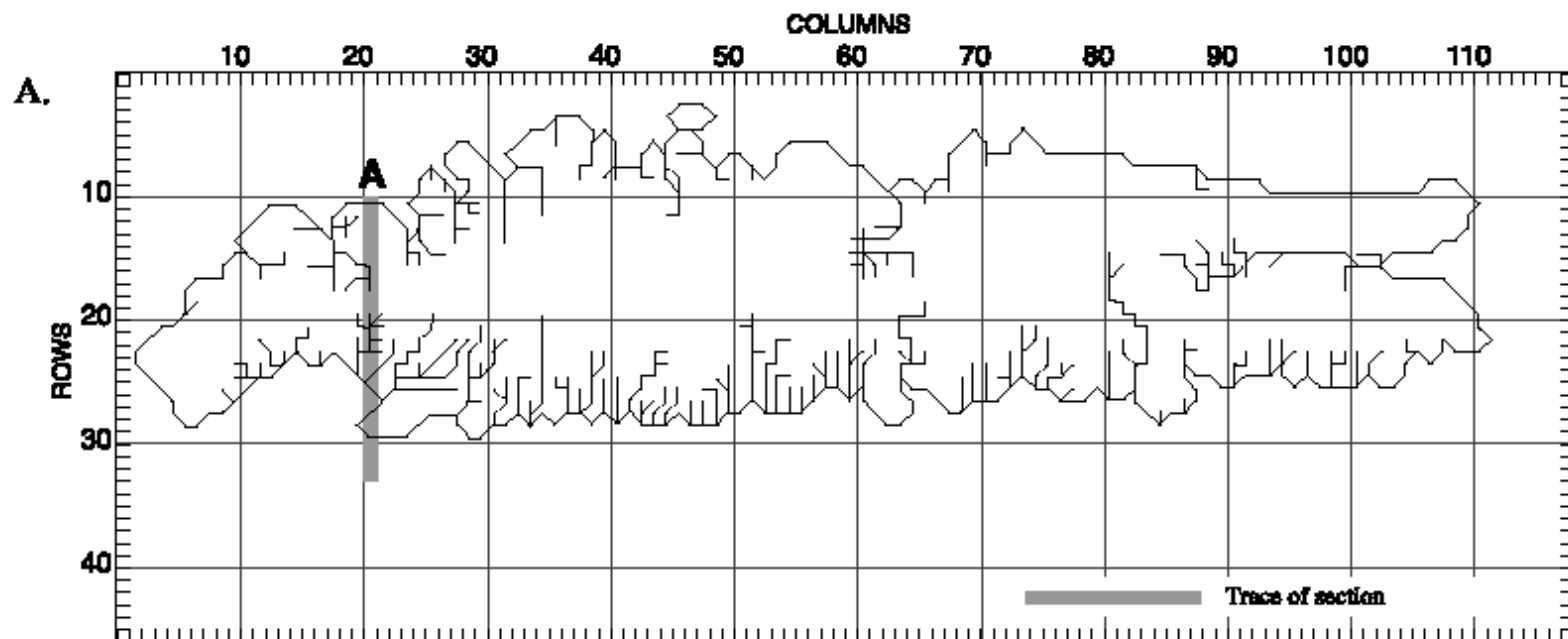




DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO VERTICAL

PASO 5

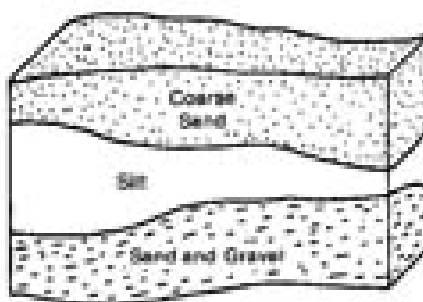




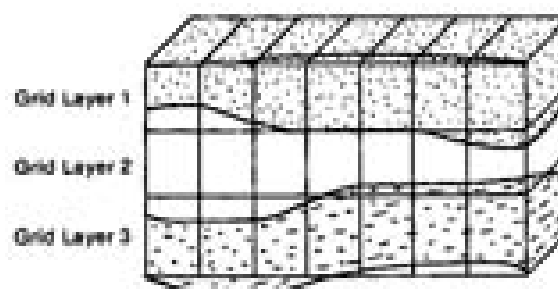
DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO VERTICAL

PASO 5

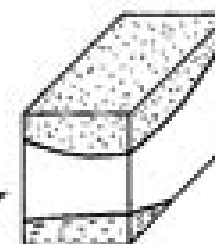




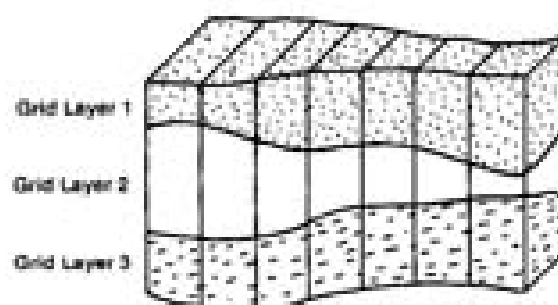
(a) Aquifer Cross Section



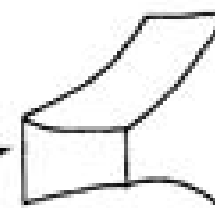
(b) Aquifer Cross Section With Rectilinear Grid Superimposed



Cell Contains Material from Three Stratigraphic Units. All Faces Are Rectangles



(c) Aquifer Cross Section With Deformed Grid Superimposed



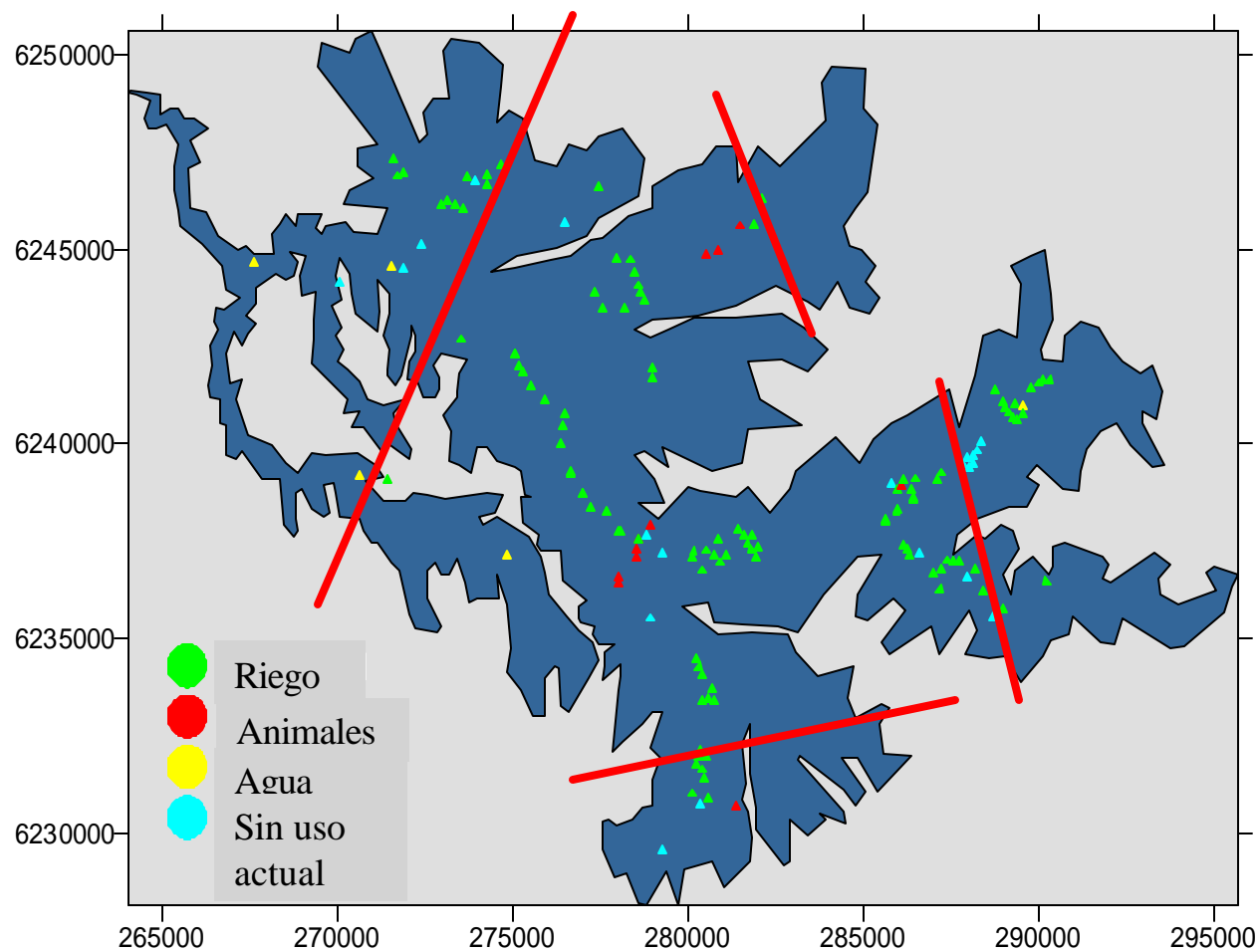
Cell Contains Material from Only One Stratigraphic Unit. Faces Are Not Rectangles

DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO VERTICAL

PASO 5



POZOS DE BOMBEO y PERFILES

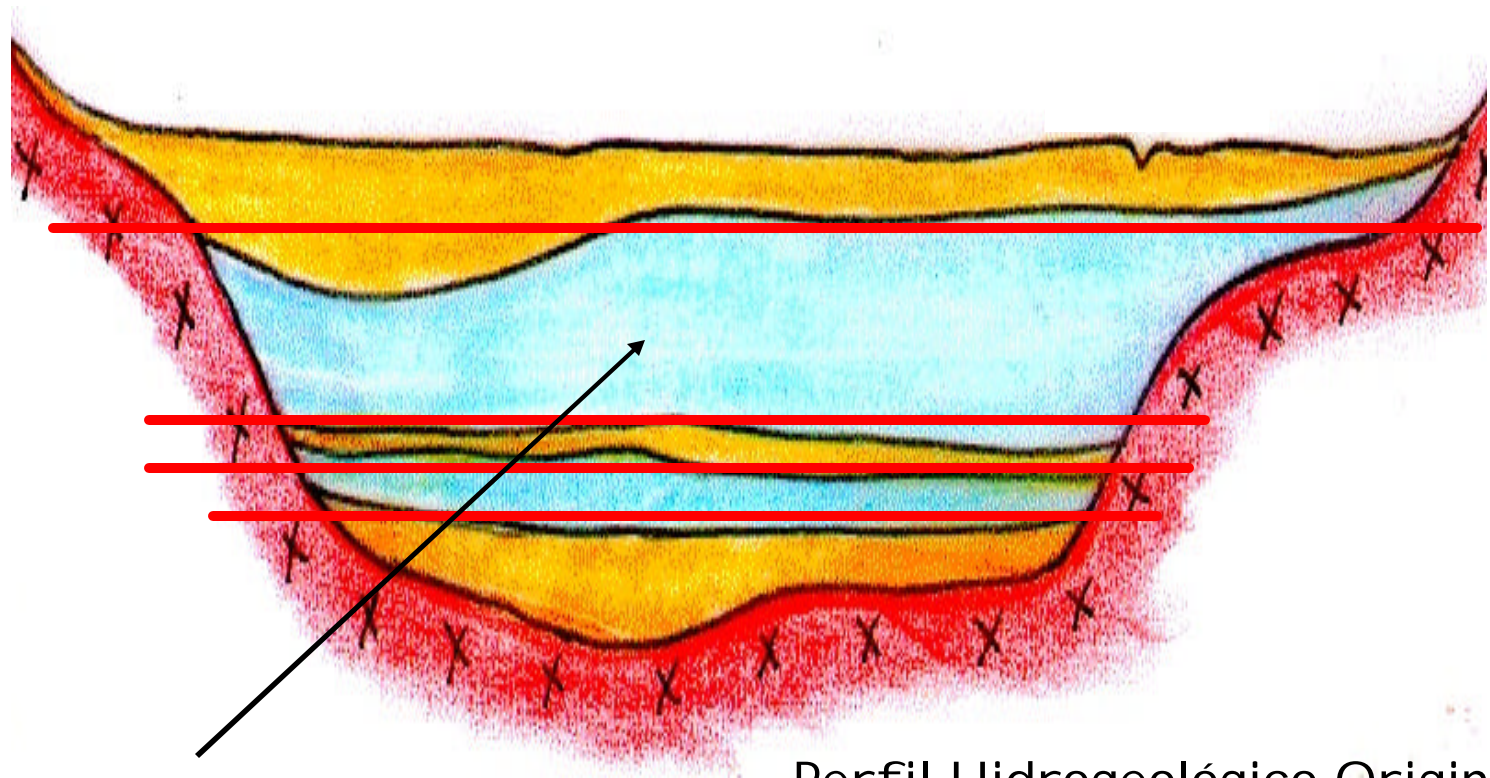


DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO VERTICAL

PASO 5



PERFILES HIDROGEOLÓGICOS: ESTRATOS



ACUI FERO

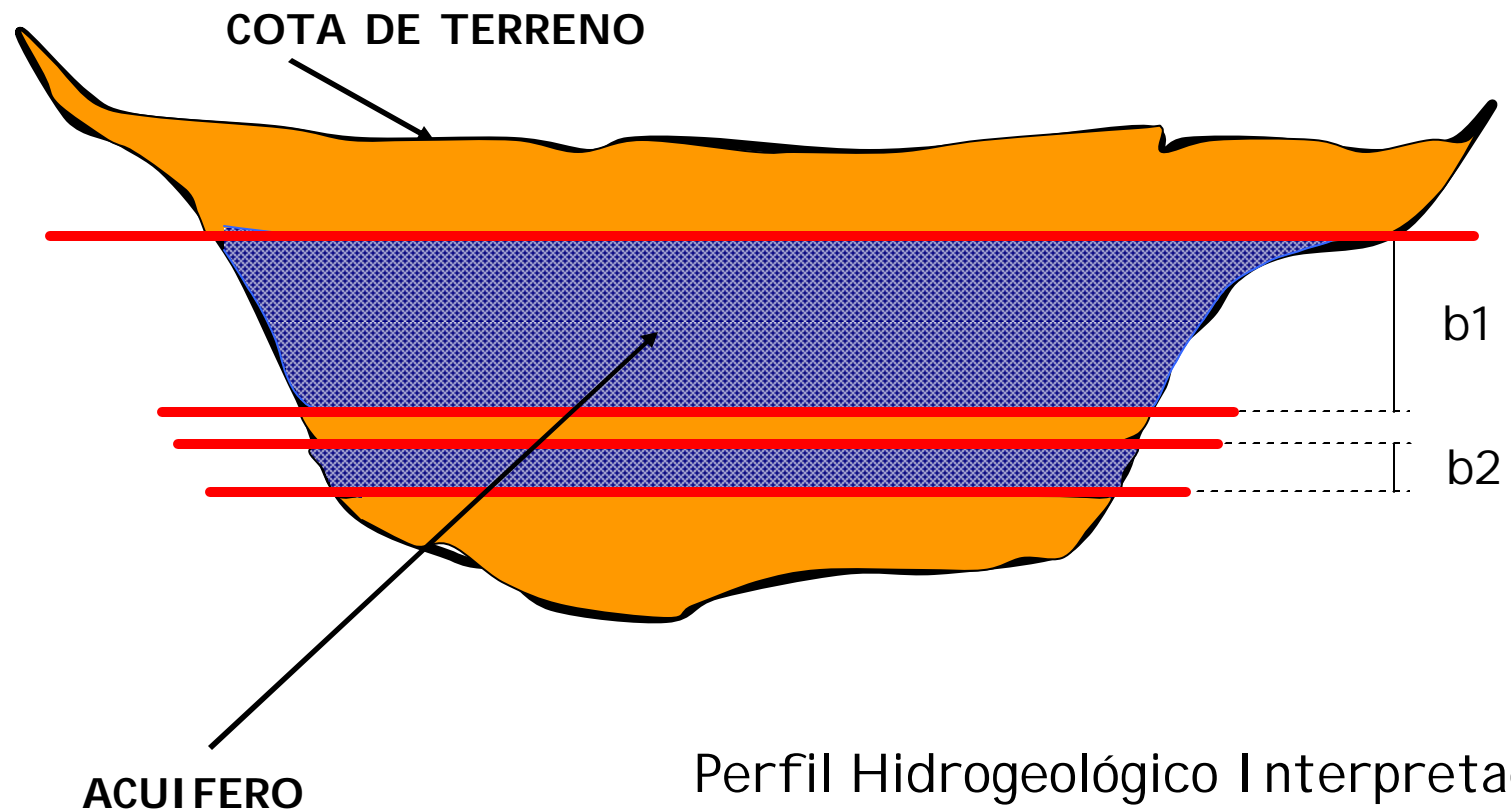
Perfil Hidrogeológico Original

DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO VERTICAL

PASO 5



PERFILES HIDROGEOLÓGICOS: ESTRATOS

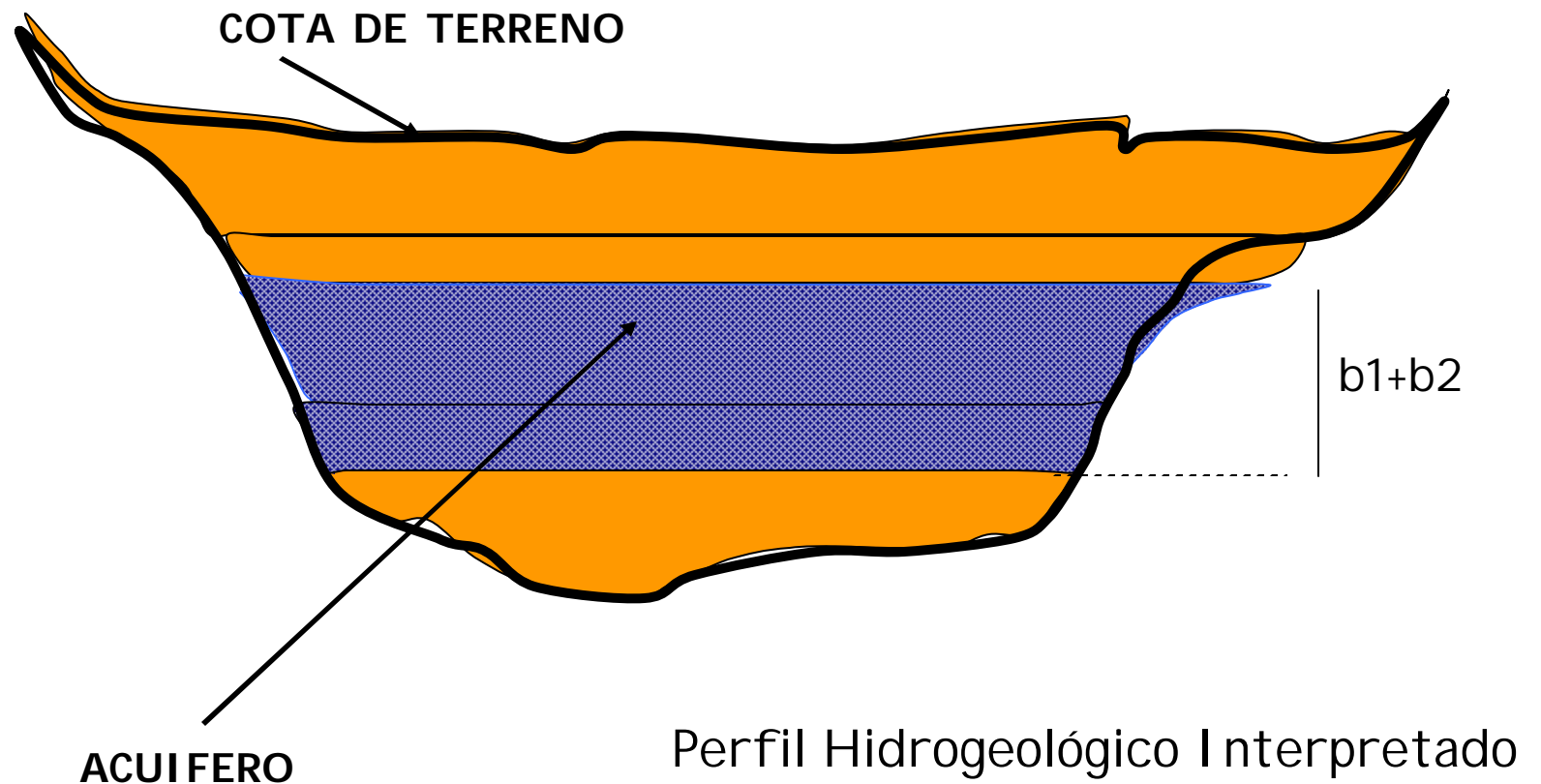


DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO VERTICAL

PASO 5



PERFILES HIDROGEOLÓGICOS: ESTRATOS

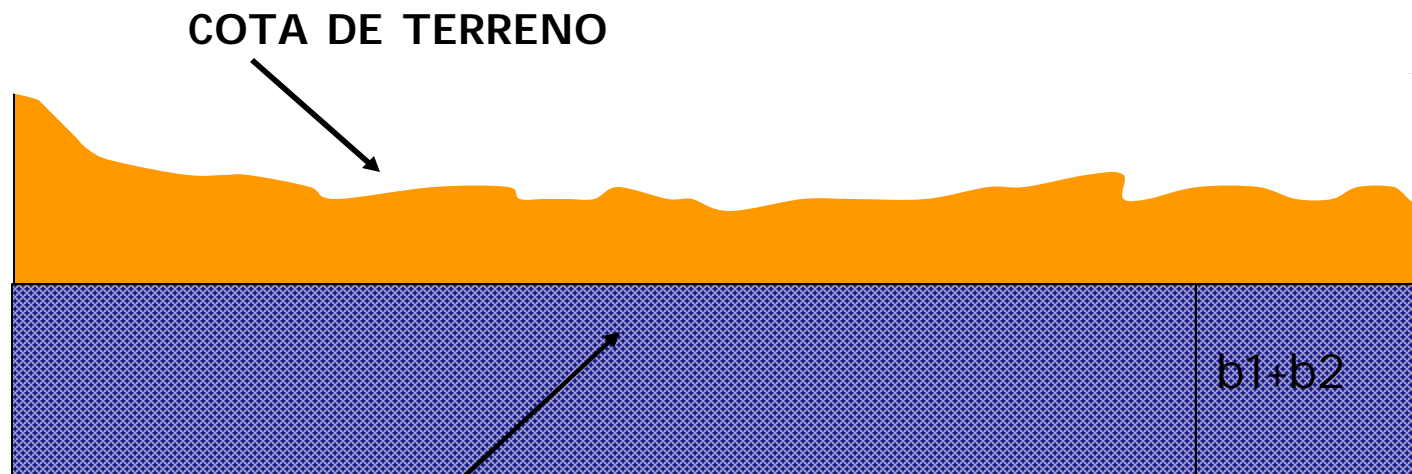


DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO VERTICAL

PASO 5



PERFILES HIDROGEOLÓGICOS: ESTRATOS



ACUIFERO

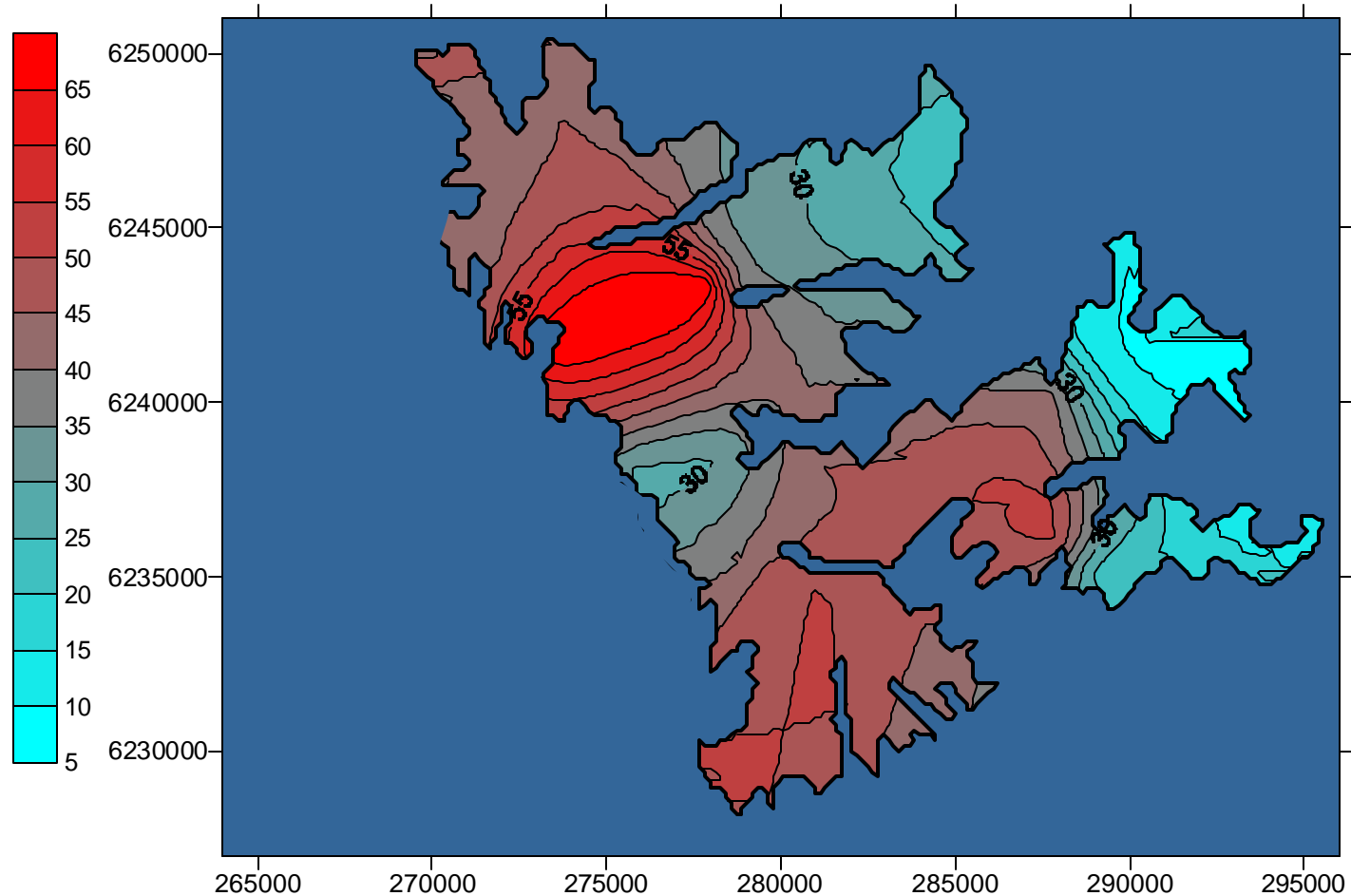
Perfil Hidrogeológico Modelo

DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO VERTICAL

PASO 5



DISTRIBUCION ESPACIAL DEL ESPESOR



DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO VERTICAL

PASO 5



IDEALIZAR SISTEMA FISICO

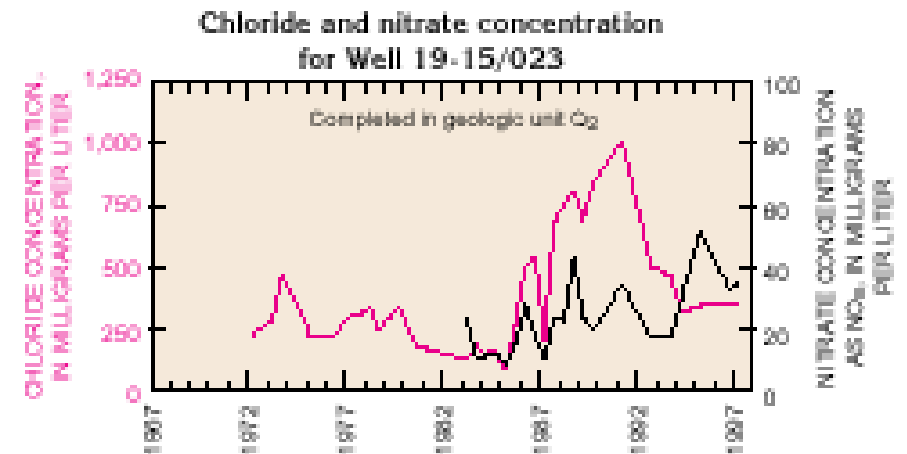
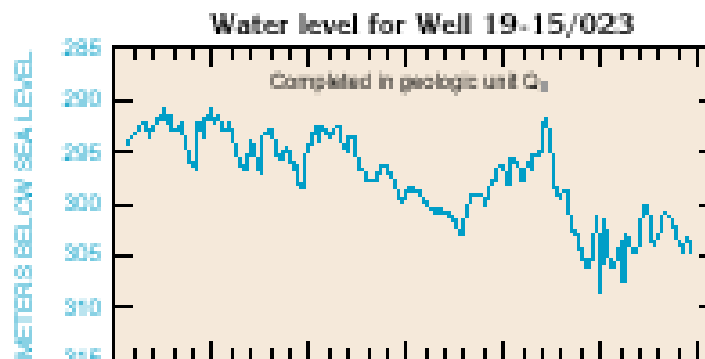
- DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO ESPACIAL
- DISCRETIZACIÓN DE MALLA EN LA DIRECCIÓN VERTICAL
- SELECCIONAR TIEMPO MÁXIMO DE SIMULACIÓN
- SELECCIONAR TIEMPO PARA INICIO DE SIMULACIÓN TRANSIENTE
- SELECCIONAR INTERVALO DE TIEMPO PARA SIMULACIÓN.



IDEALIZAR SISTEMA FISICO

- Seleccionar tiempo máximo de simulación

- Analizar los objetivos del modelo.
- Evaluar datos disponibles a nivel histórico.
- Identificar metodologías para evaluar nivel de información requerido.



TIEMPO MAXIMO DE SIMULACION

PASO 5



IDEALIZAR SISTEMA FISICO

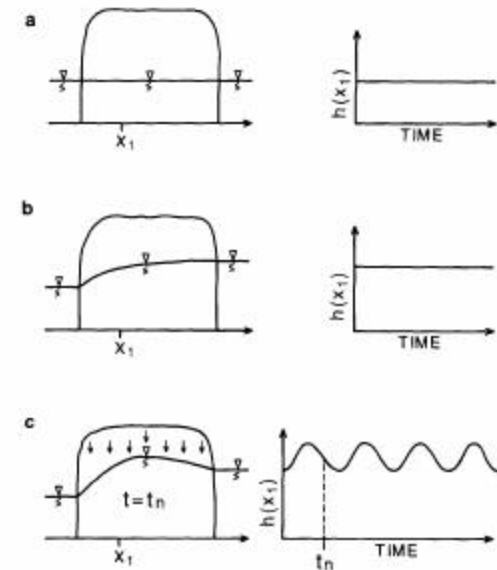
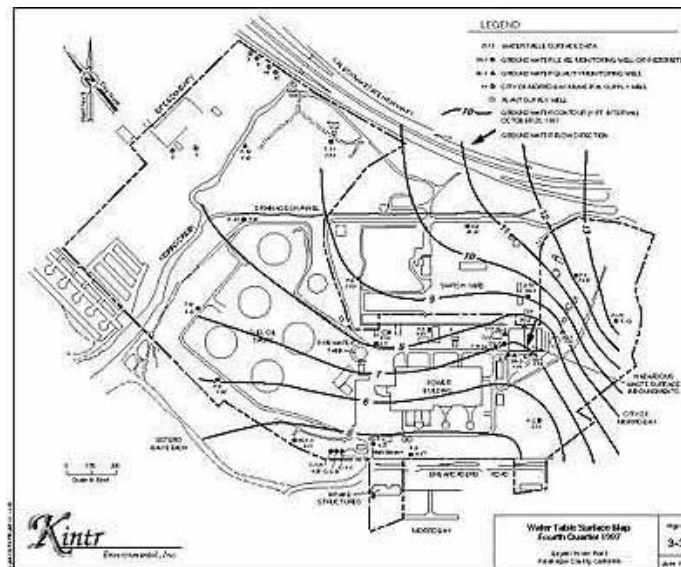
- DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO ESPACIAL
- DISCRETIZACIÓN DE MALLA EN LA DIRECCIÓN VERTICAL
- SELECCIONAR TIEMPO MÁXIMO DE SIMULACIÓN
- SELECCIONAR TIEMPO PARA INICIO DE SIMULACIÓN TRANSIENTE
- SELECCIONAR INTERVALO DE TIEMPO PARA SIMULACIÓN.



IDEALIZAR SISTEMA FISICO

- Seleccionar tiempo para inicio de simulación transiente

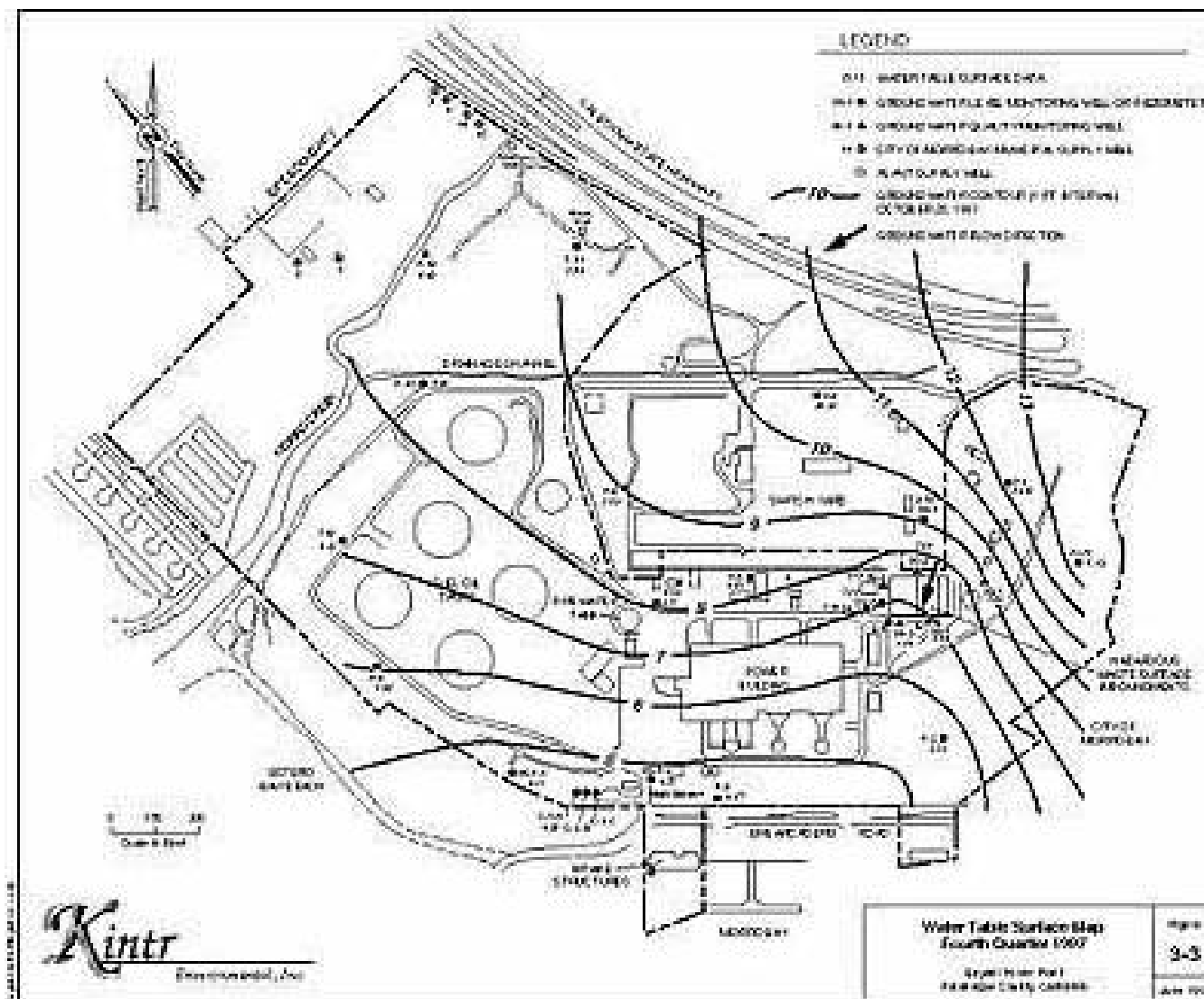
- Disponer de "fotografía" del momento.
- Datos históricos de nivel de agua subterránea.



TIEMPO DE INICIO PARA SIMULACION

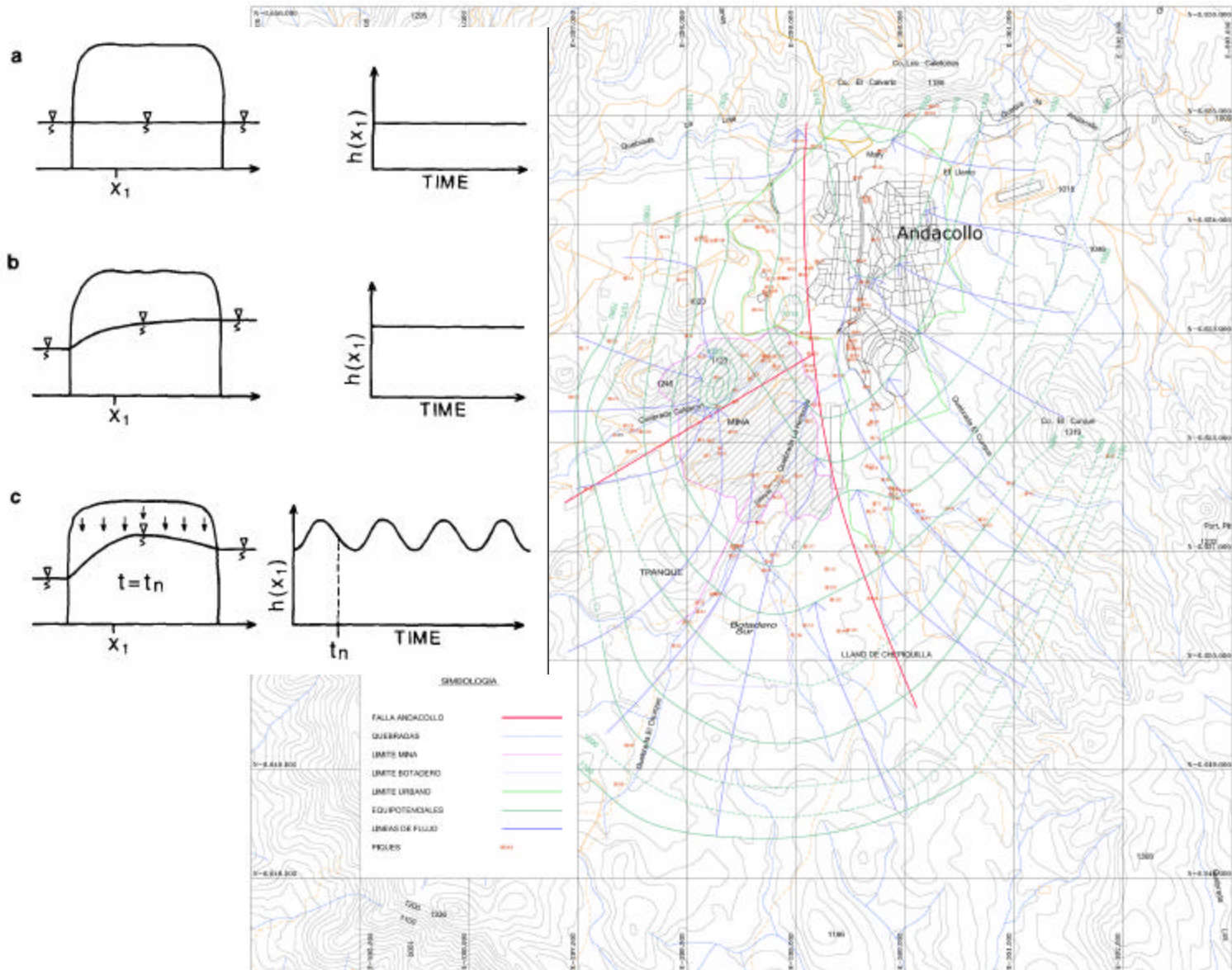
PASO 5





TIEMPO DE INICIO PARA SIMULACION

PASO 5



TIEMPO DE INICIO PARA SIMULACION

PASO 5



IDEALIZAR SISTEMA FISICO

- DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO ESPACIAL
- DISCRETIZACIÓN DE MALLA EN LA DIRECCIÓN VERTICAL
- SELECCIONAR TIEMPO MÁXIMO DE SIMULACIÓN
- SELECCIONAR TIEMPO PARA INICIO DE SIMULACIÓN TRANSIENTE
- SELECCIONAR INTERVALO DE TIEMPO PARA SIMULACIÓN.



IDEALIZAR SISTEMA FISICO

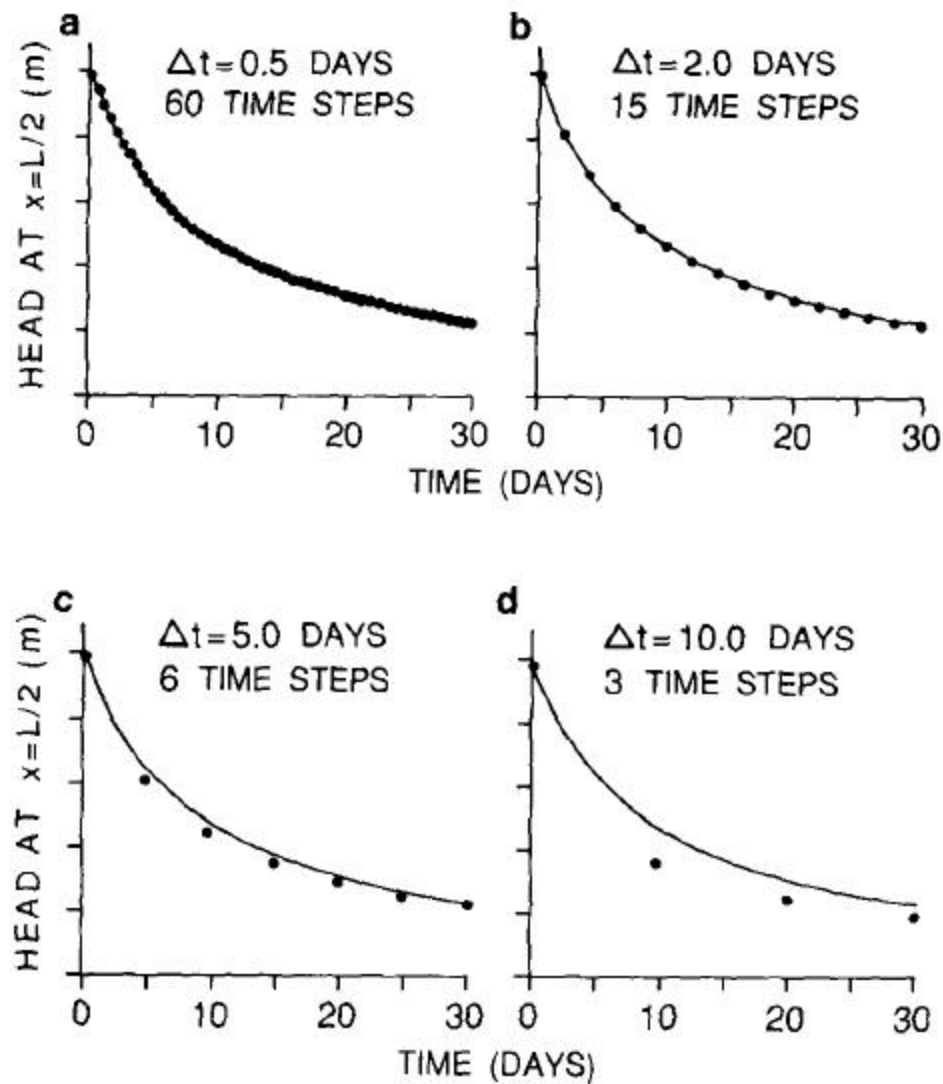
- Seleccionar intervalo de tiempo para simulación.

- Analizar los objetivos del modelo.
- Evaluar datos disponibles a nivel histórico.
- Identificar metodologías para sintetizar datos al nivel de información requerido.
- Comenzar con un intervalo de tiempo mayor (por ejemplo trimestral) y luego analizar el efecto de reducir intervalo a otro menor (mensual).
- Restricciones de computador y tiempo disponible.



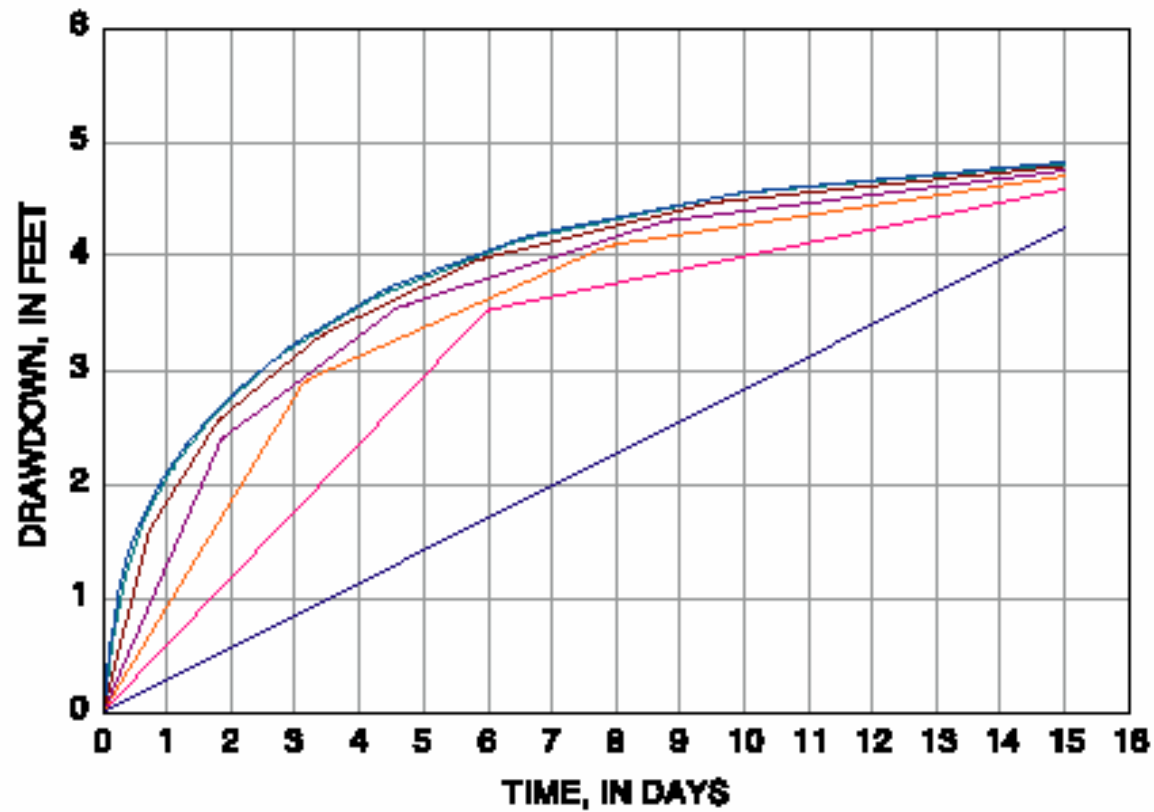
INTERVALO DE TIEMPO PARA SIMULACION

PASO 5



INTERVALO DE TIEMPO PARA SIMULACION

PASO 5



EXPLANATION

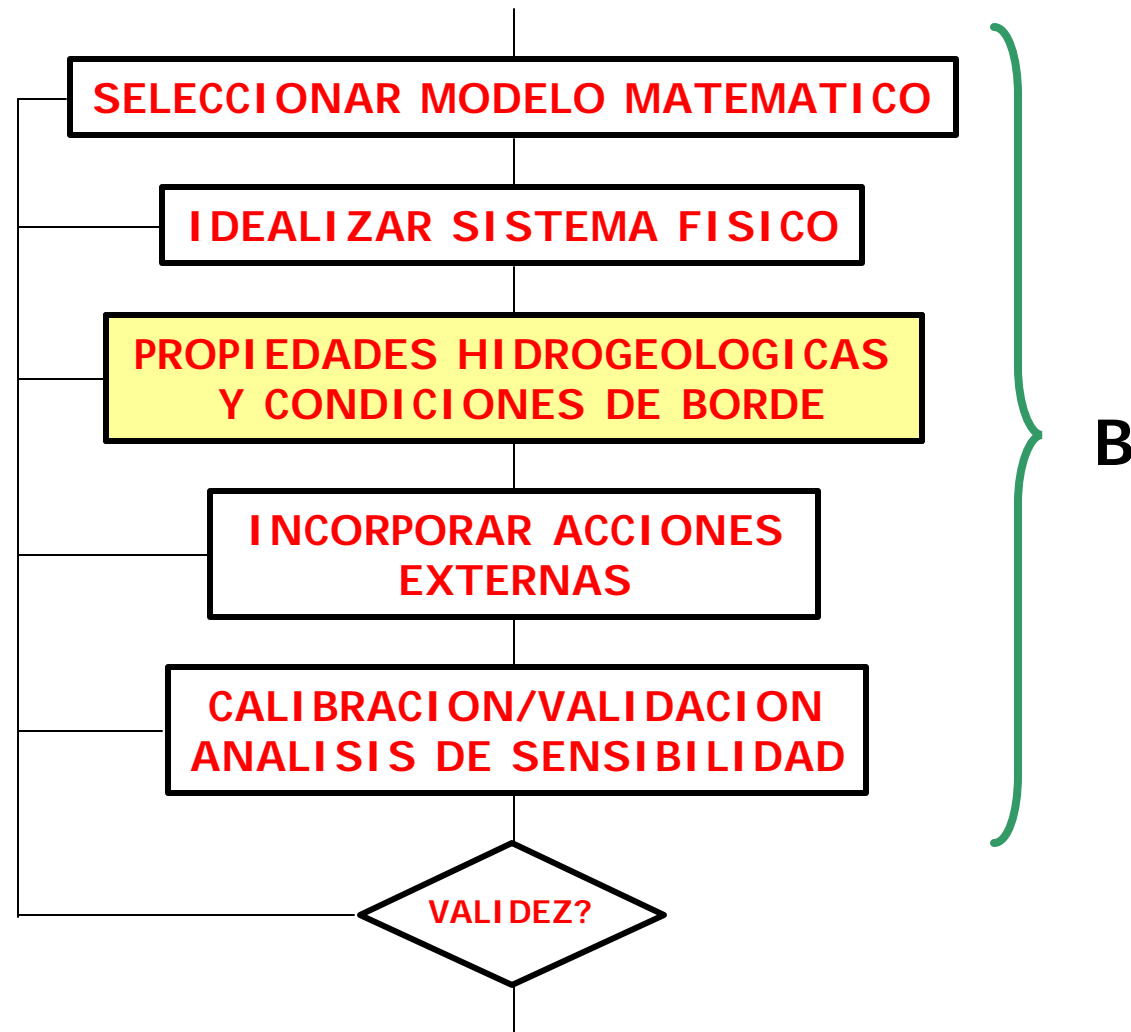
- | | |
|-----------|------------|
| — 1 STEP | — 6 STEPS |
| — 2 STEPS | — 10 STEPS |
| — 3 STEPS | — 20 STEPS |
| — 4 STEPS | |

INTERVALO DE TIEMPO PARA SIMULACION

PASO 5



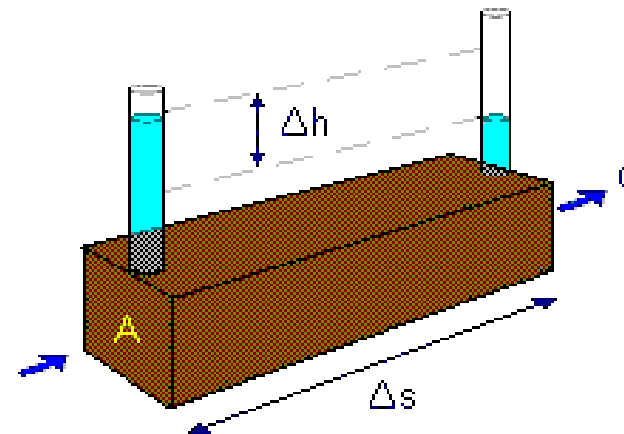
ETAPA B: MODELO HIDROGEOLOGICO



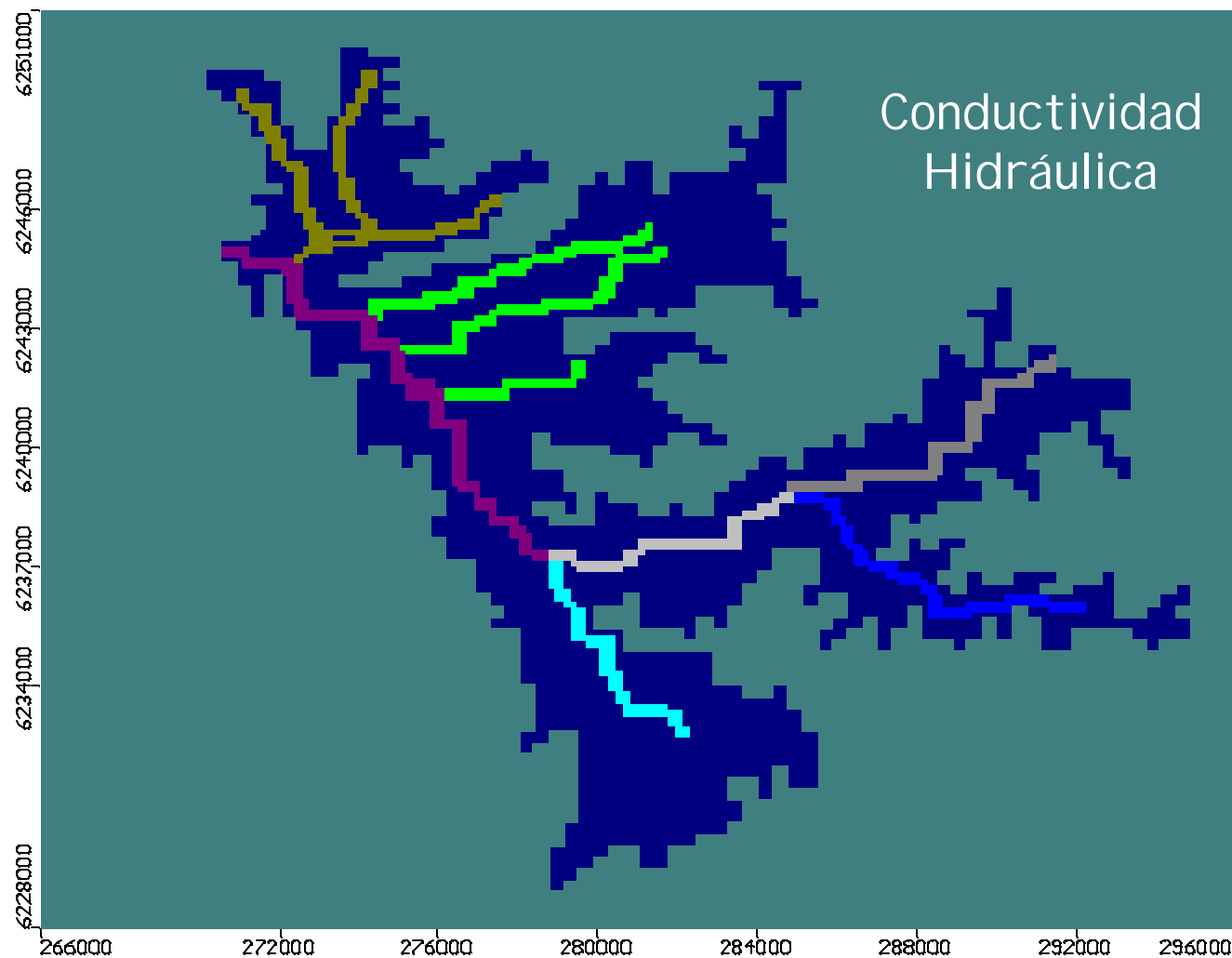
PROPIEDADES HIDROGEOLOGICAS

Las propiedades físicas a describir son:

- Conductividad hidráulica (K),
- Coeficiente de almacenamiento (S) en cada acuífero,
- Conductancia hidráulica vertical (K_i'/b_i') entre distintos acuíferos.
- Porosidad total (n)
- Porosidad efectiva (n_e)



PROPIEDADES HIDROGEOLOGICAS

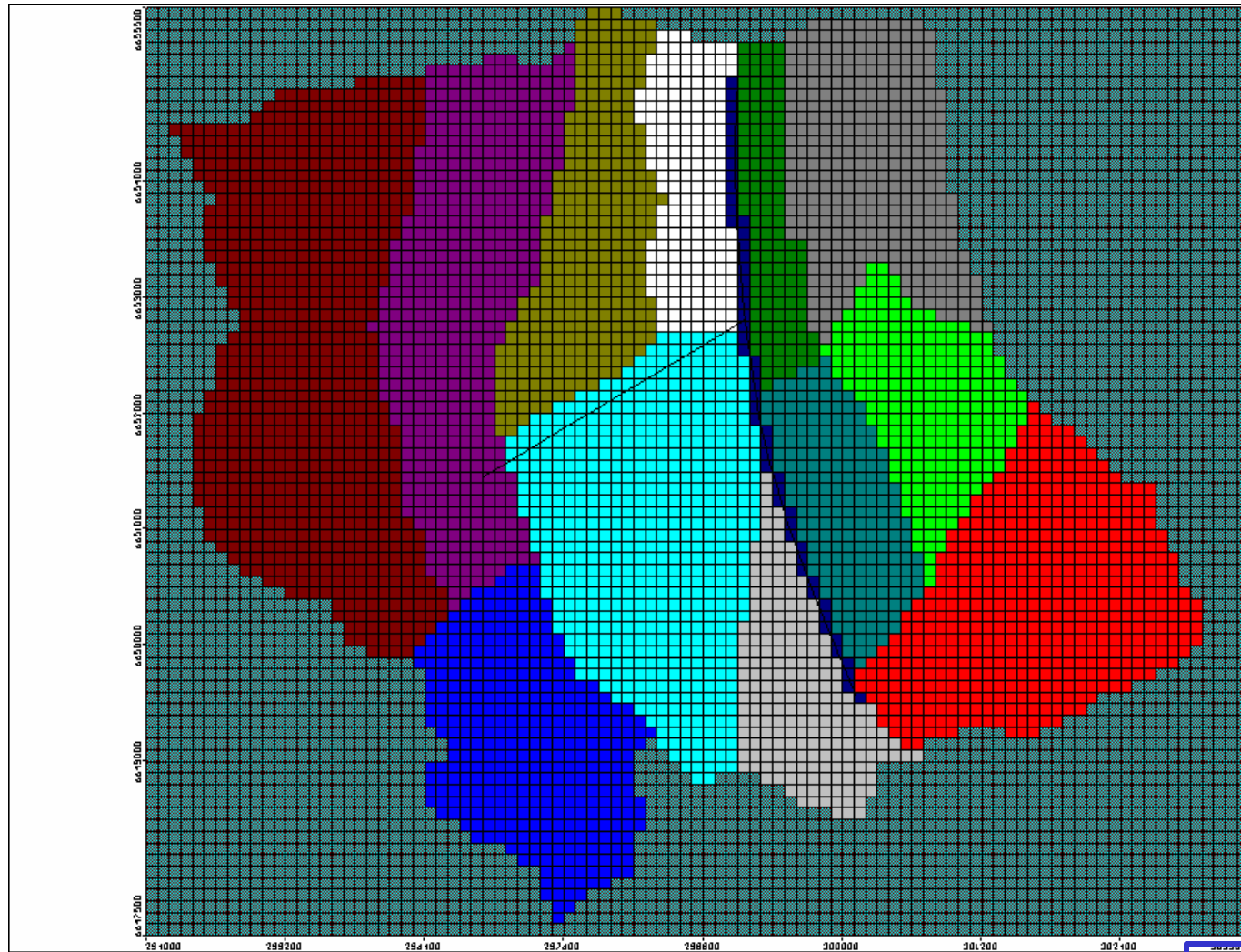


PASO 6





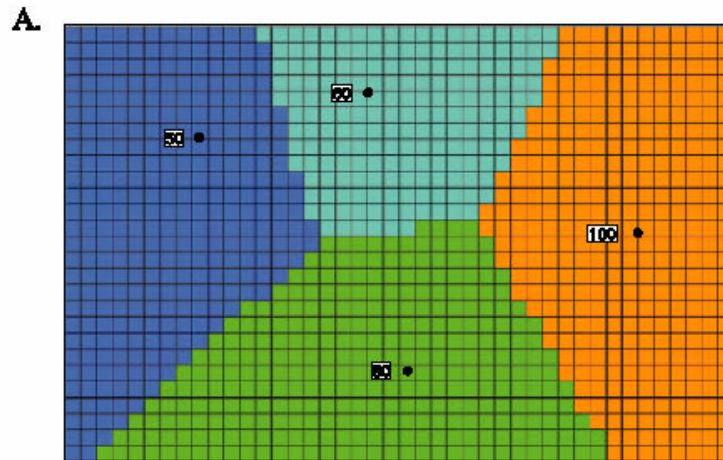
PROPIEDADES HIDROGEOLOGICAS



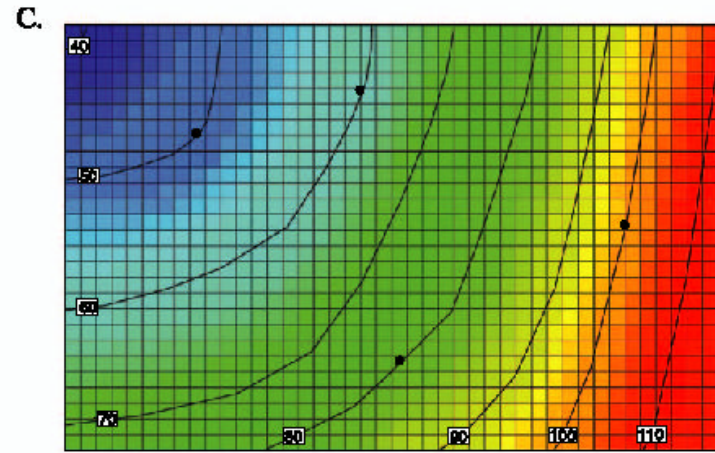
PASO 6



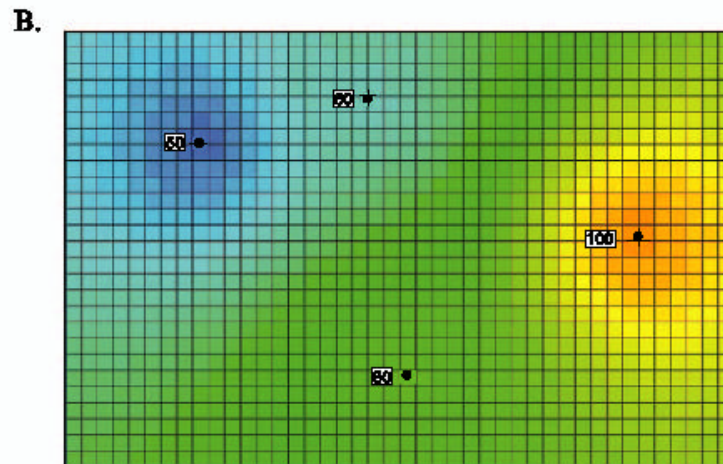
PROPIEDADES HIDROGEOLOGICAS



Cell value is the nearest measured value

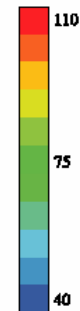


Cell value is the distance-weighted average of the two adjacent contours



Cell value is the inverse-distance-squared weighted average of measured values

EXPLANATION
HYDRAULIC CONDUCTIVITY,
IN FEET PER DAY



— CONTOUR OF HYDRAULIC
CONDUCTIVITY, IN FEET
PER DAY, CONTOUR INTERVAL
IS 10 FEET PER DAY

100 • DATA POINT LOCATION AND
VALUE OF HYDRAULIC
CONDUCTIVITY, IN FEET
PER DAY

PASO 6

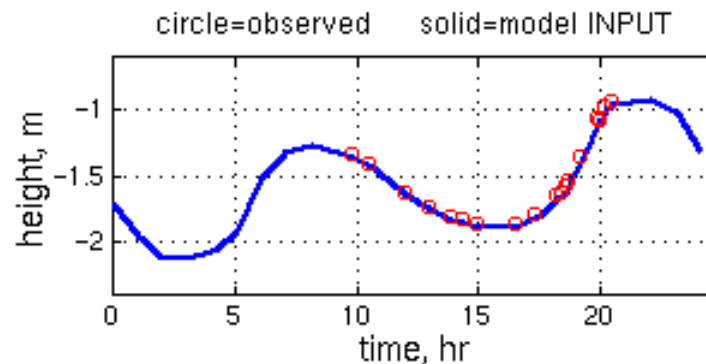


CONDICIONES DE BORDE

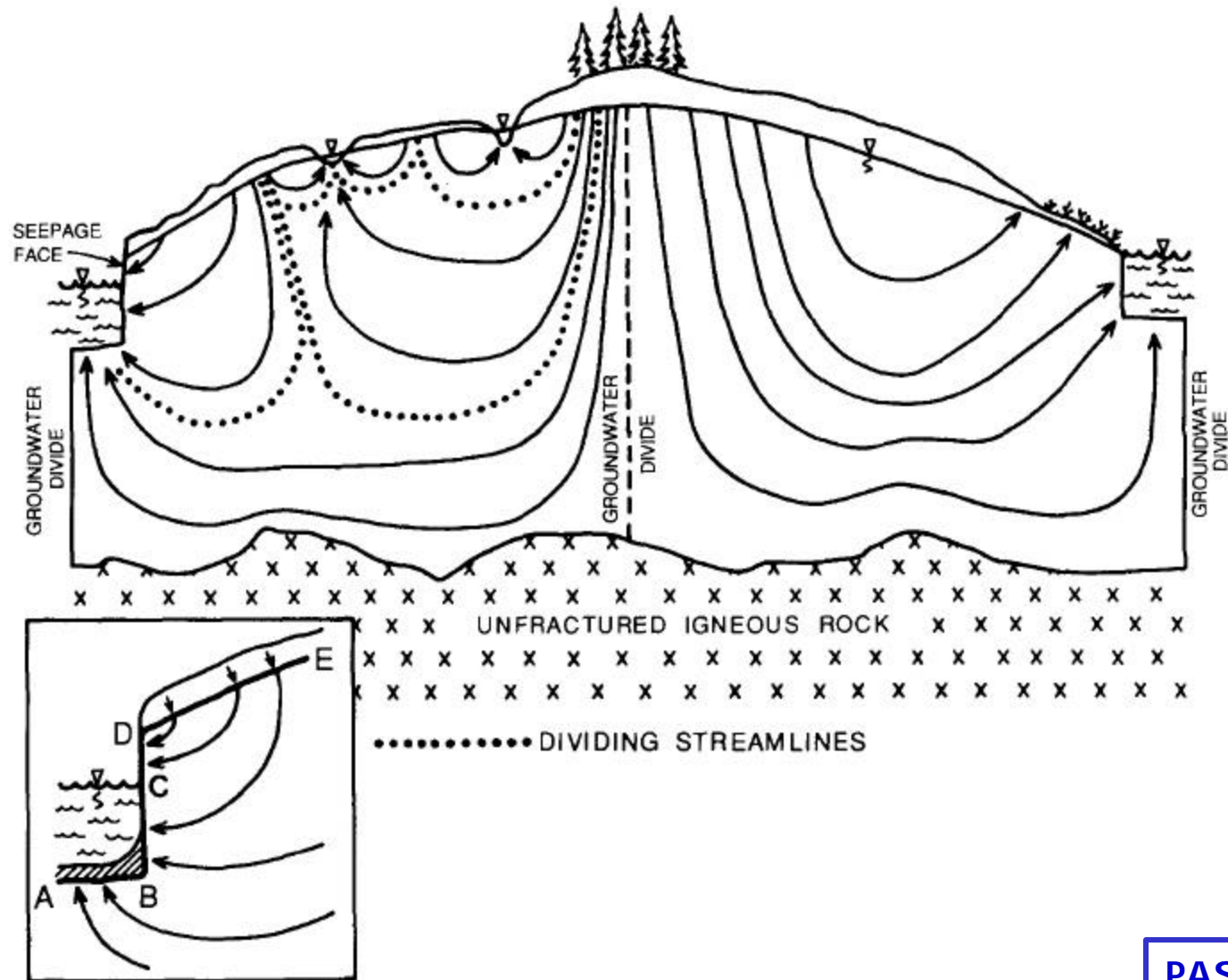
- Asignación de Condiciones de Borde

- Ríos y lagos
- Drenes y sistemas de drenaje
- Divisorias de agua subterránea
- Datos que varían en el tiempo

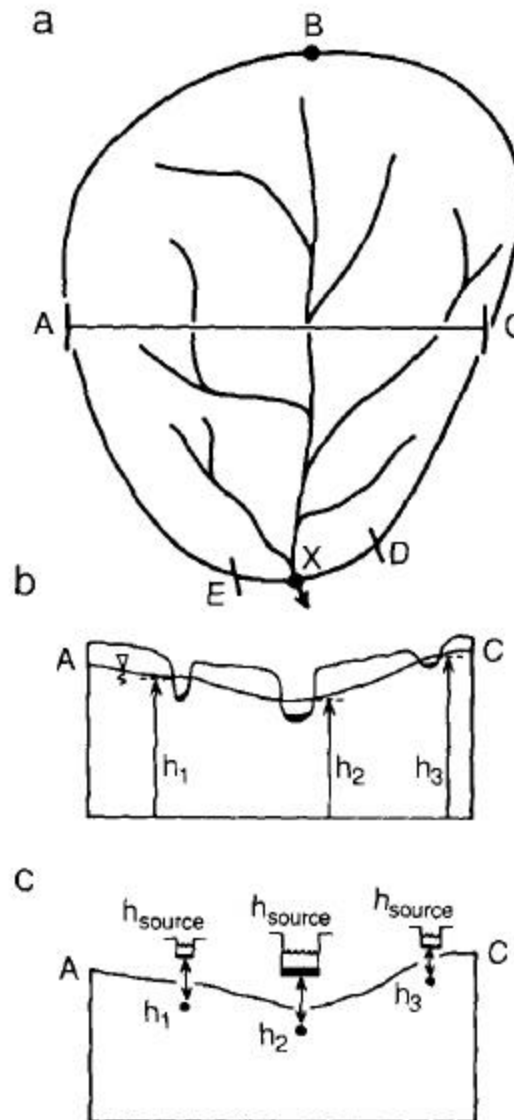
- Todo modelo requiere de al menos una condición de borde de nivel piezométrico o Dirichlet



CONDICIONES DE BORDE



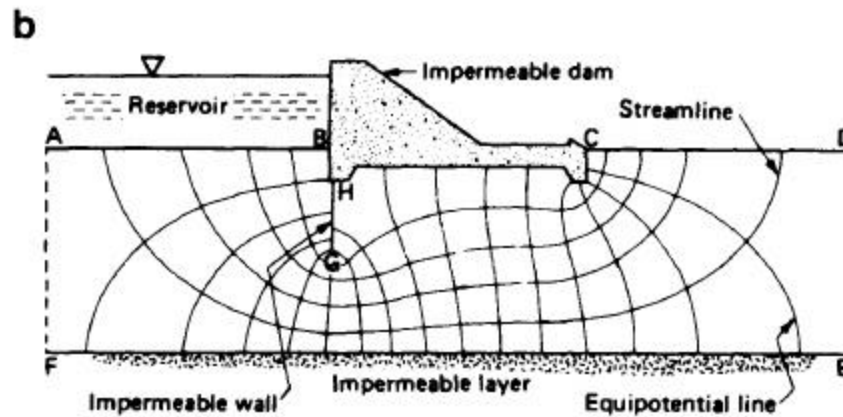
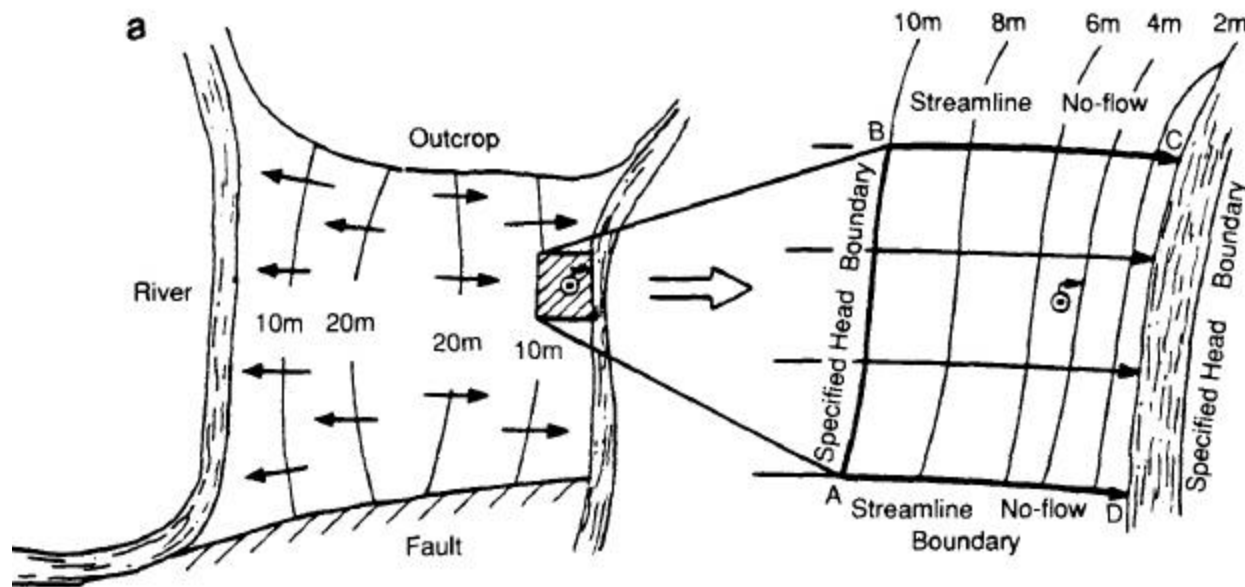
CONDICIONES DE BORDE



PASO 6



CONDICIONES DE BORDE



CONDICIONES DE BORDE

Dentro de las condiciones de borde se especifican las siguientes:

Bordes con carga conocida:

- Carga hidráulica conocida

Bordes con flujos dependientes de la carga:

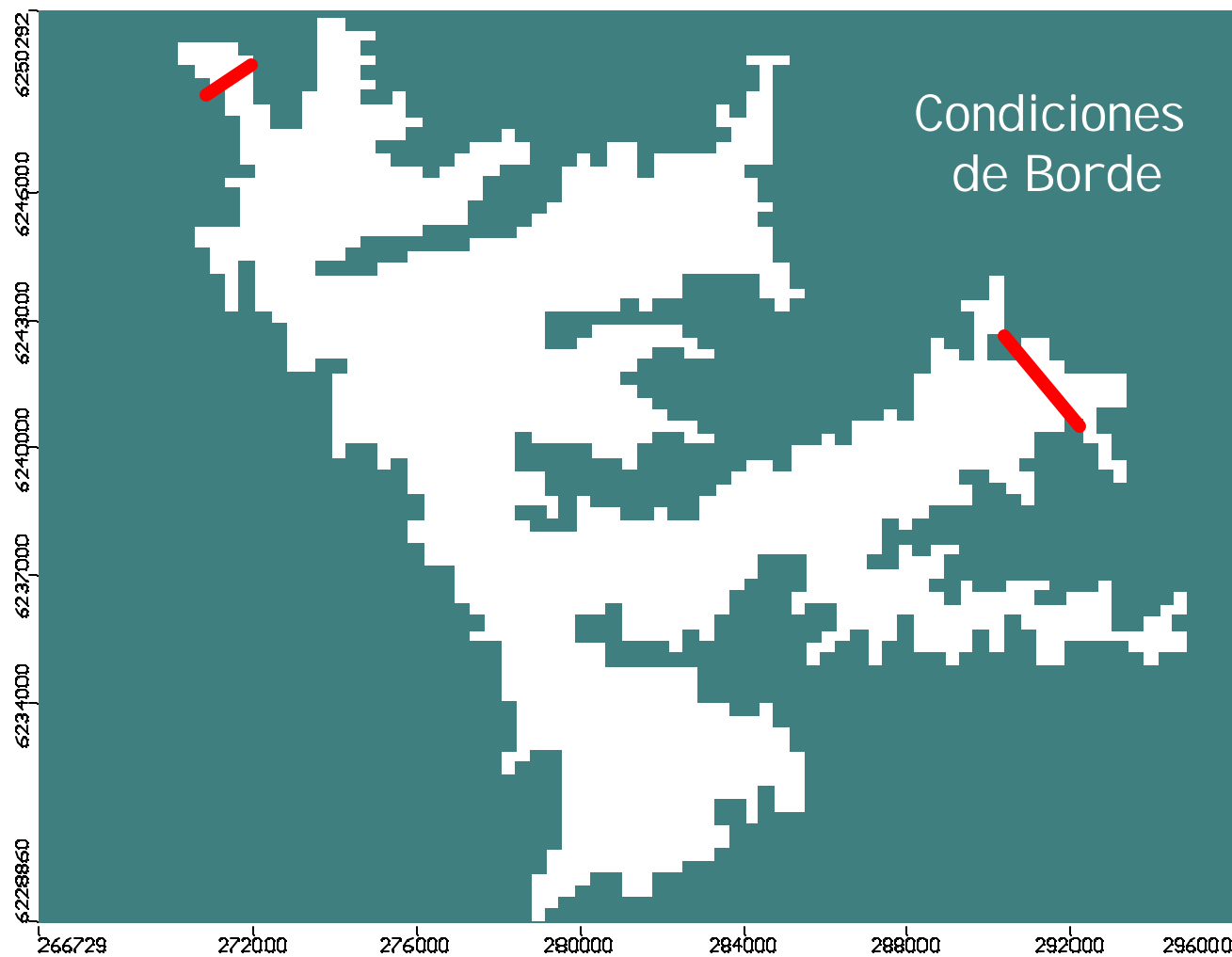
- Recarga desde río
- Drenes
- General Head Boundary

Bordes de no flujo

- Muro (Wall)



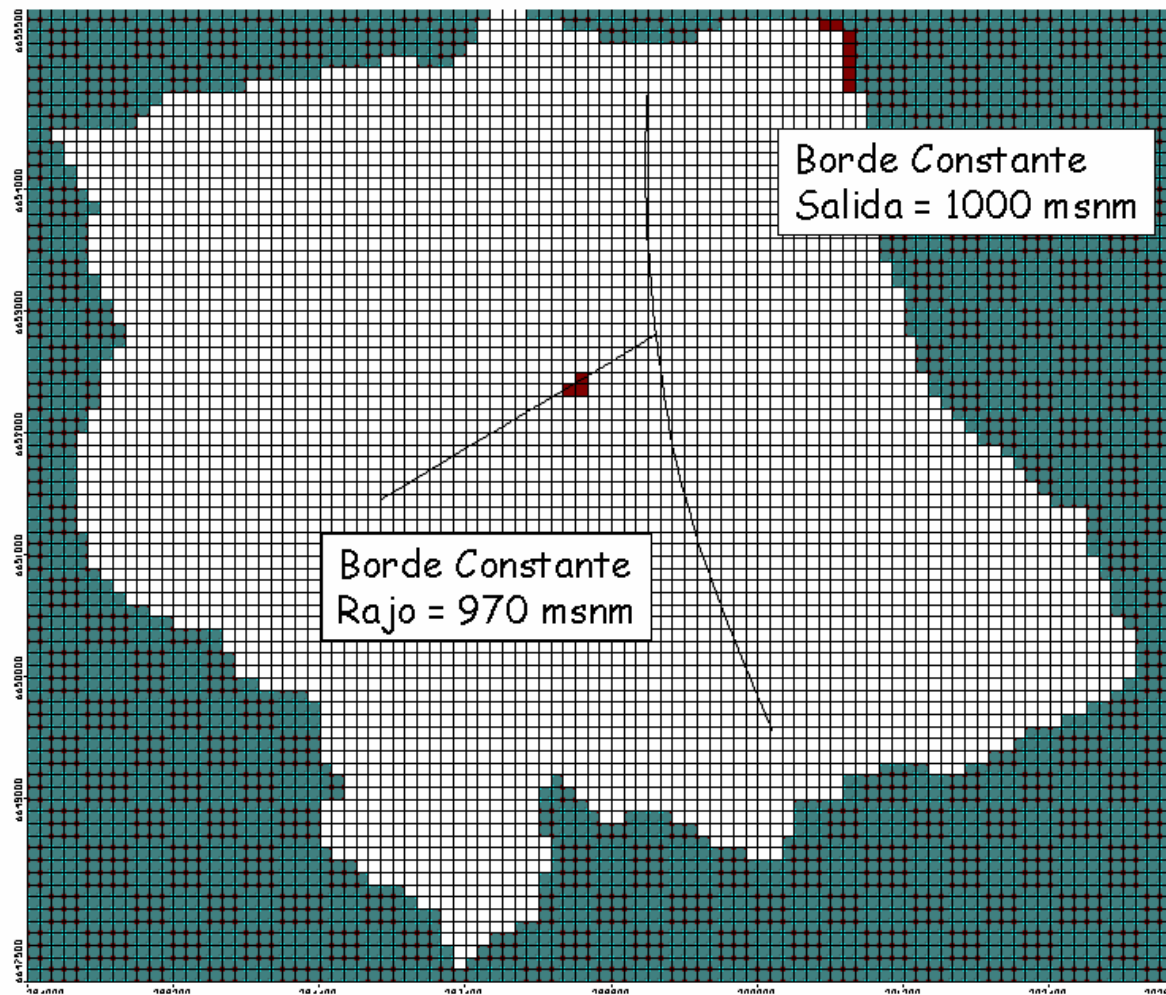
CONDICIONES DE BORDE



PASO 6



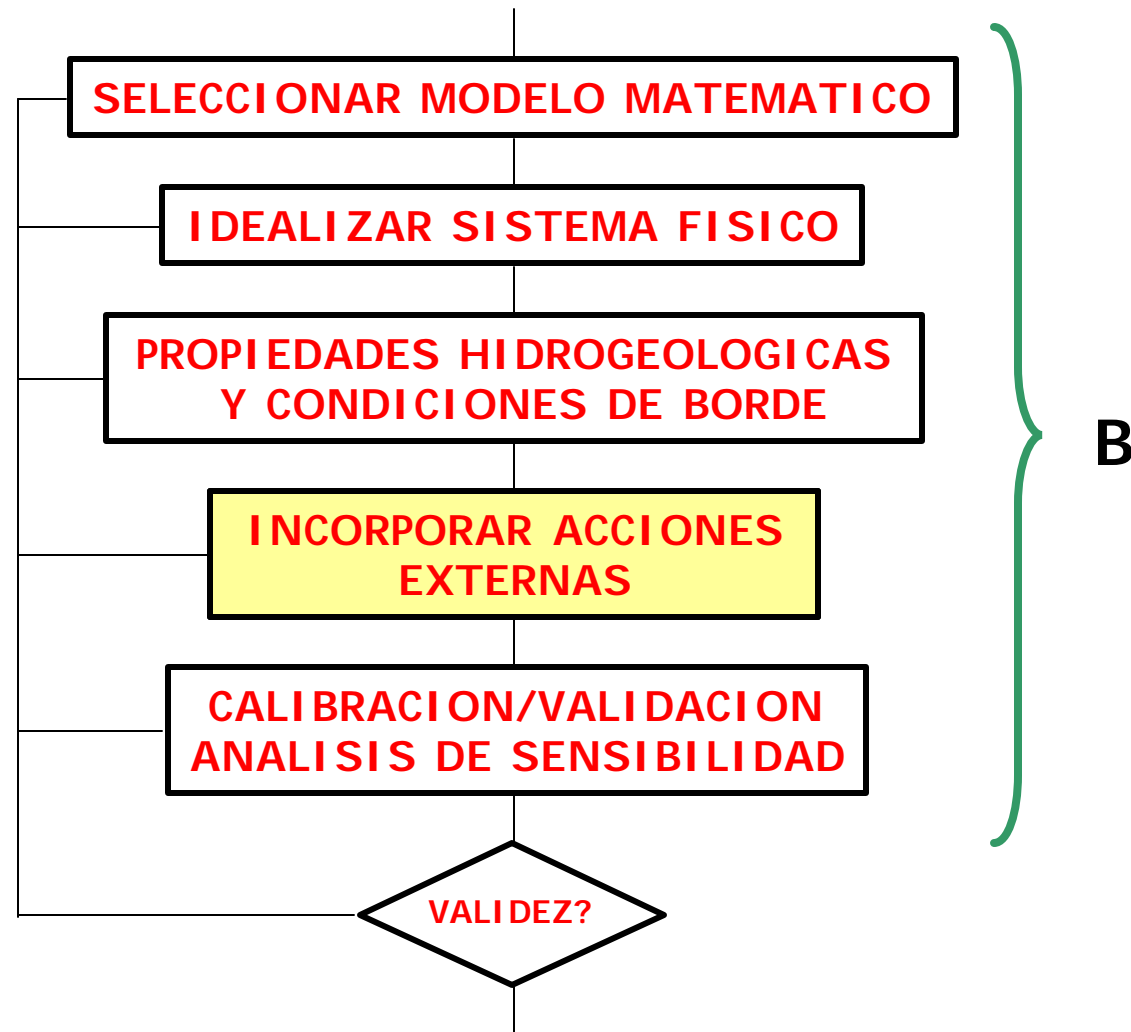
CONDICIONES DE BORDE



PASO 6



ETAPA B: MODELO HIDROGEOLOGICO



INCORPORAR ACCIONES EXTERNAS

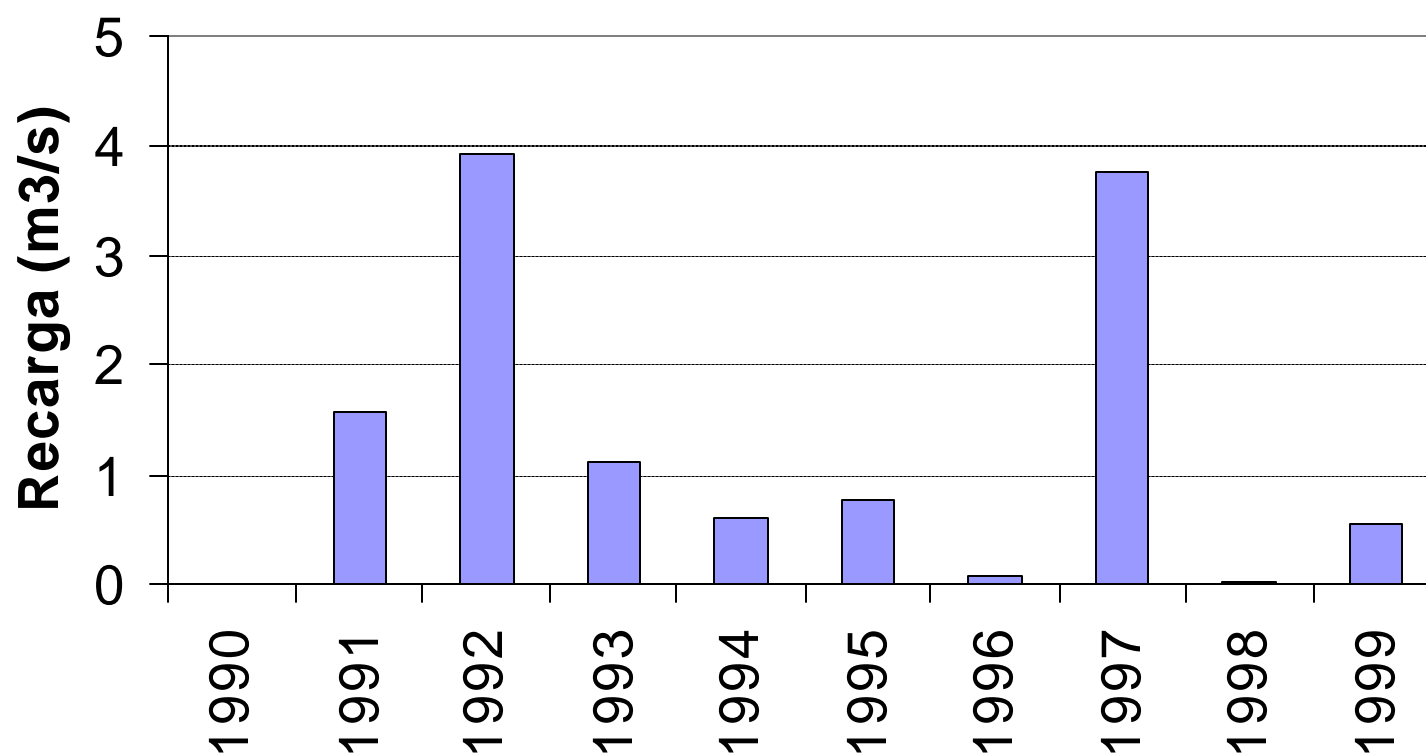
Las dos acciones externas que se debe considerar en un modelo de simulación hidrogeológica son la **recarga** y la **extracción**.

-La recarga se obtiene mediante el balance hídrico. La observación de mapas de superficies de nivel de agua permite definir la distribución primaria del volumen. Debe evaluarse además el volumen recargado por riego, pérdidas de agua potable o residual, así como toda otra recarga de importancia.

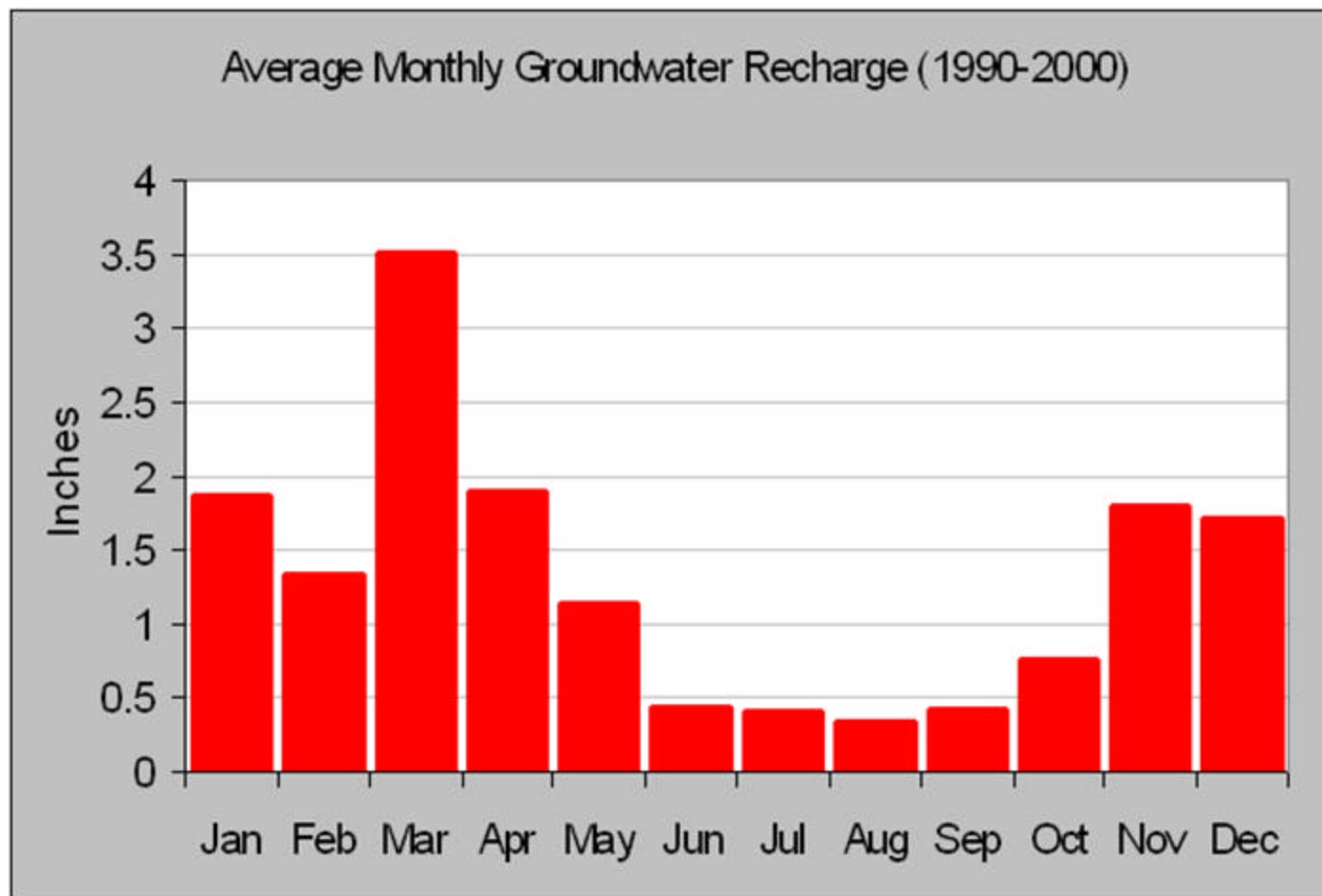
-La extracción debe obtenerse mediante inspección del área y encuestas cuidadosas. Debe apuntarse la distribución temporal con precisión.



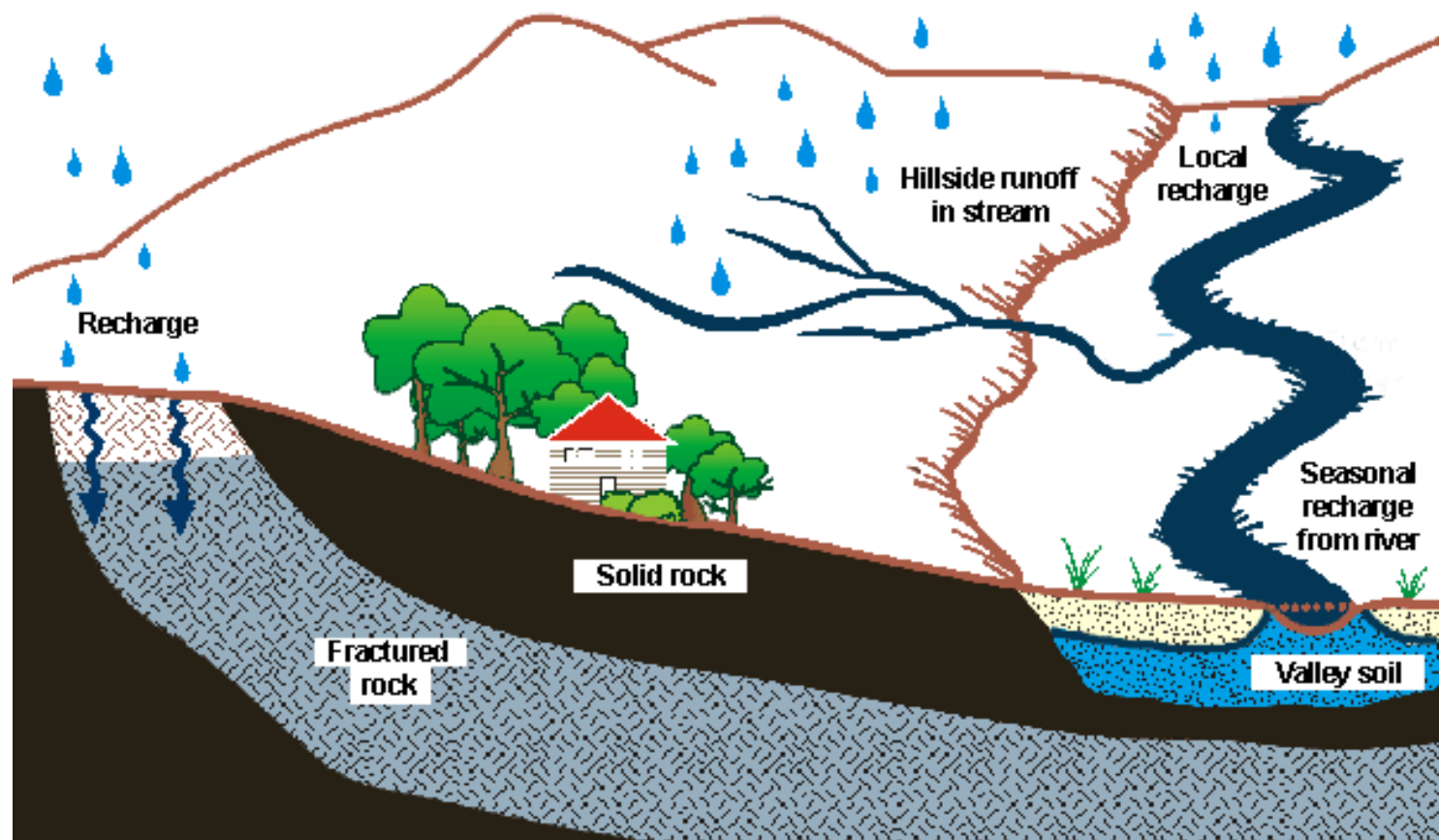
RECARGA SUPERFICIAL TOTAL POR AÑO



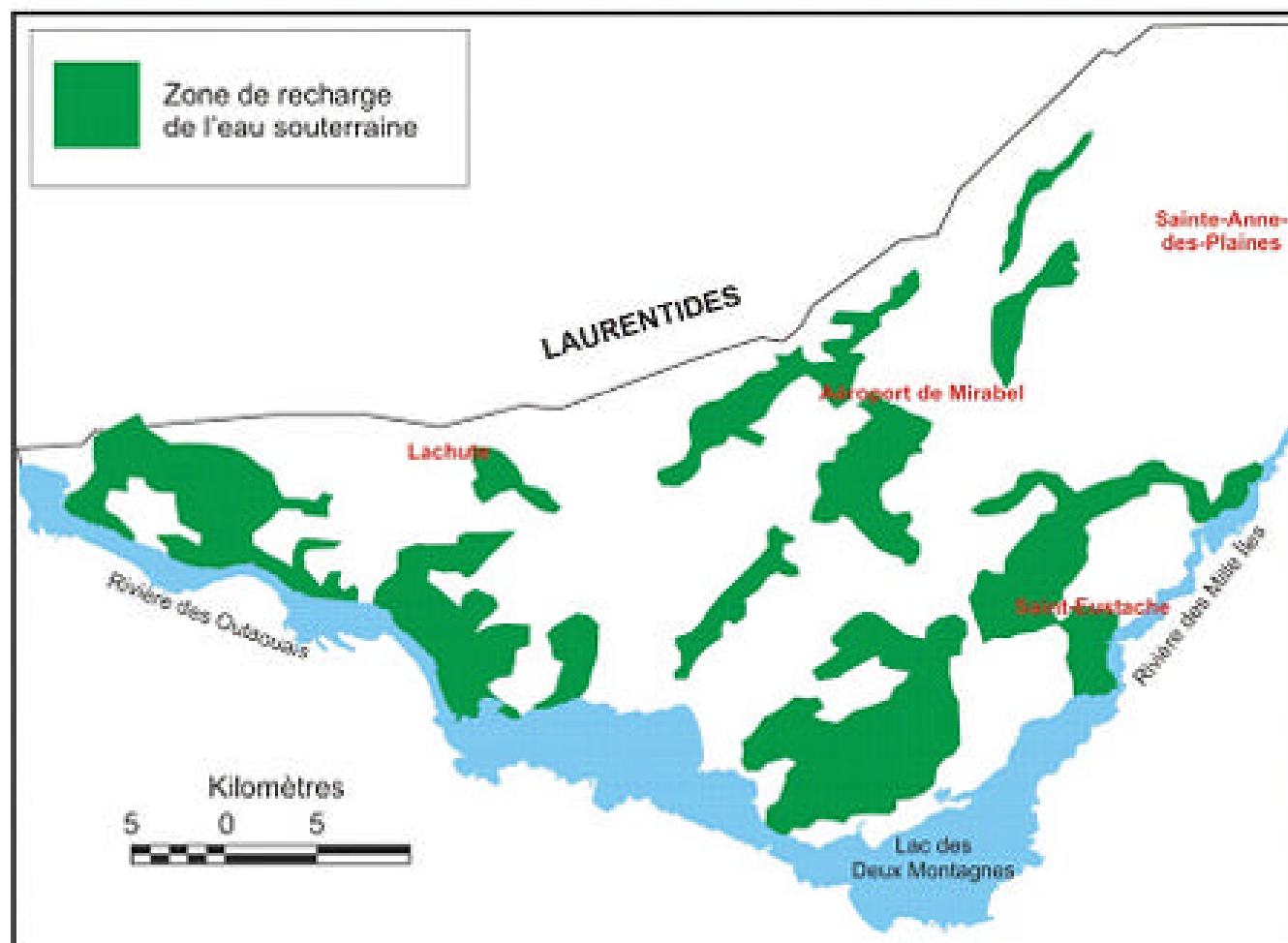
VARIACION MENSUAL RECARGA



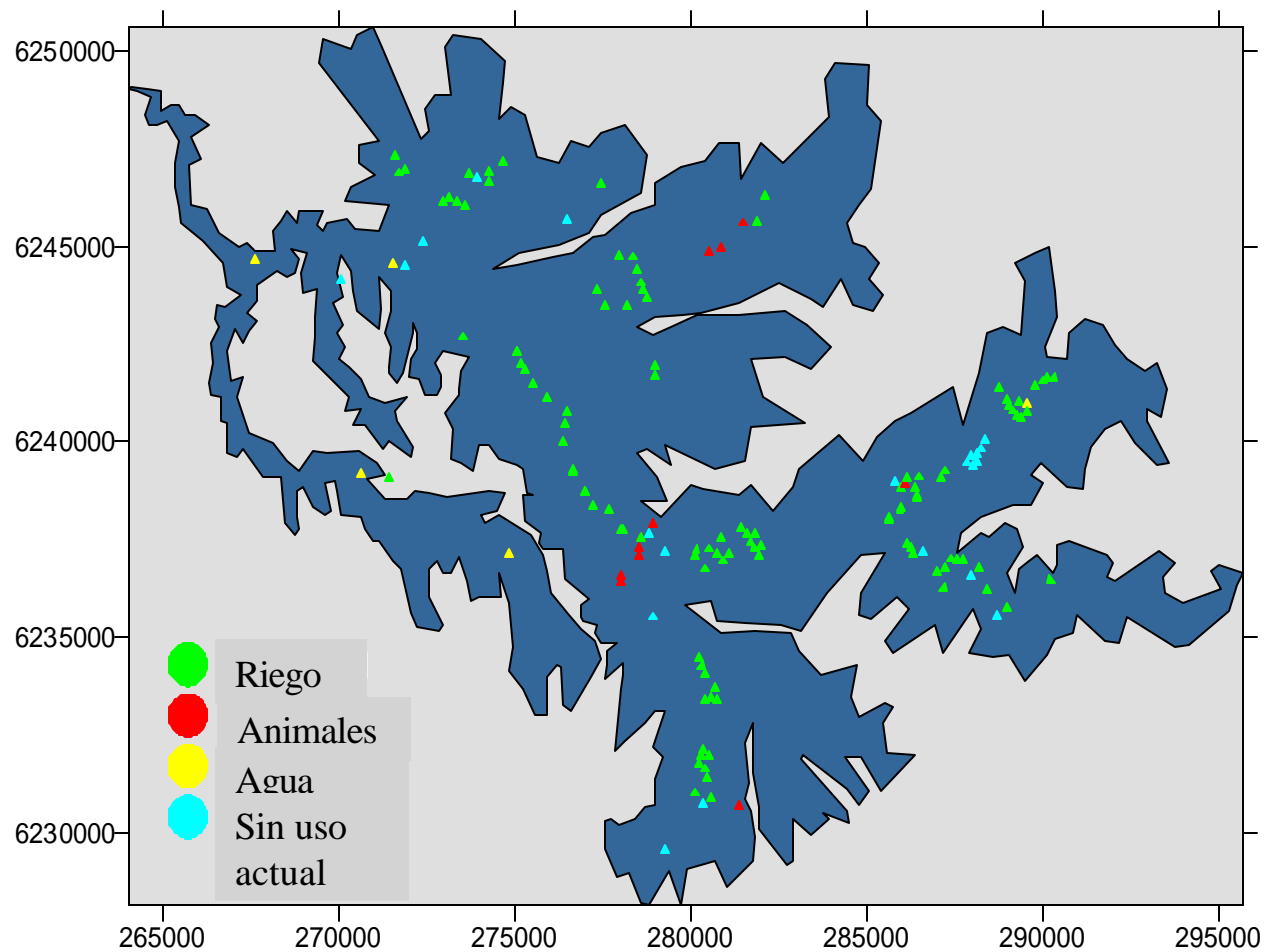
MECANISMOS DE RECARGA



ZONAS DE RECARGA



POZOS DE BOMBEO EN ZONA DE ESTUDIO



PASO 7



OPERACIÓN POZOS DE BOMBEO

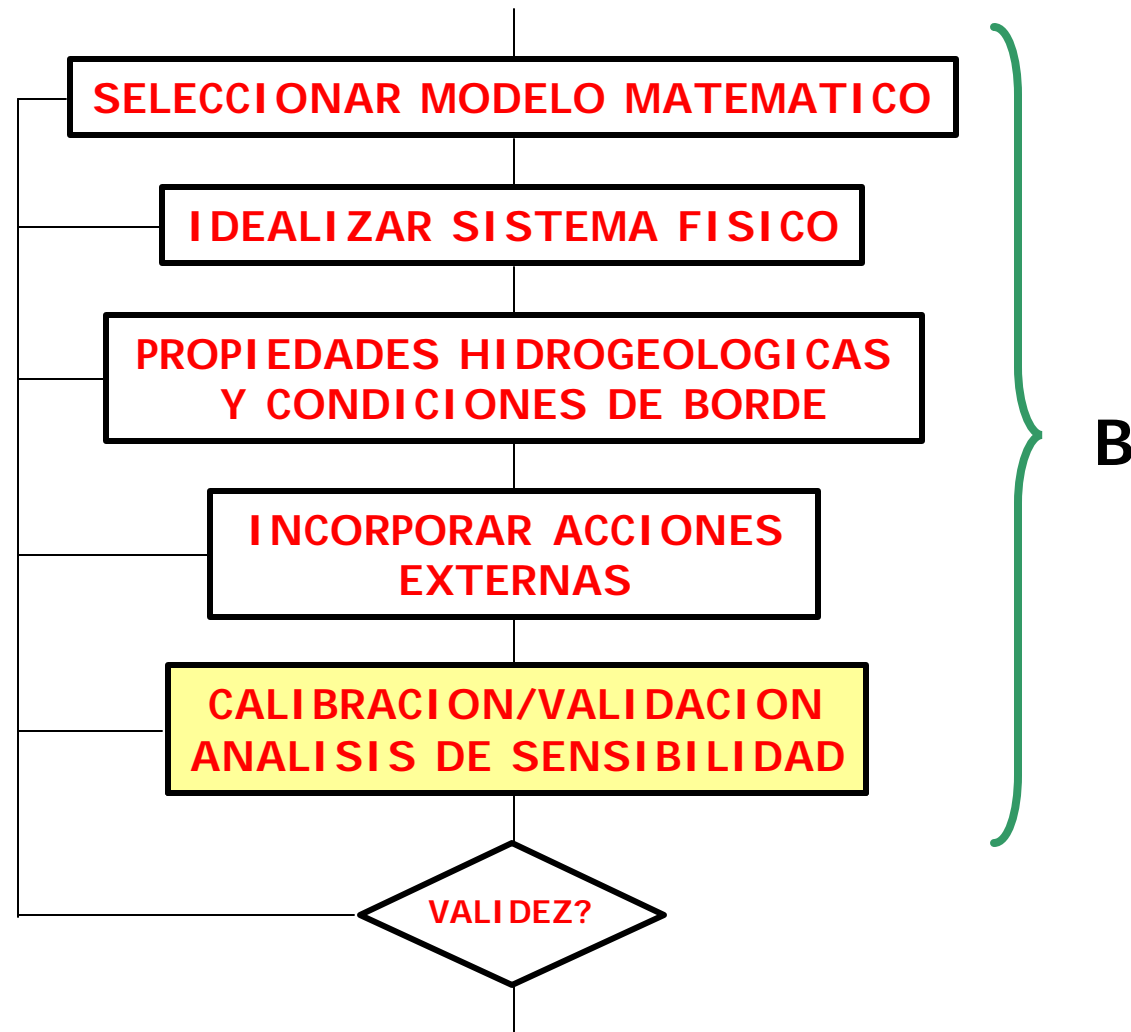


Agua Potable
Agricultura
Minería
Industria

PASO 7



ETAPA B: MODELO HIDROGEOLOGICO



CALIBRACION

El **proceso de calibración** es básicamente una etapa en la cual un determinado número de parámetros del modelo hidrogeológico (por ejemplo K) son ajustados (o modificados) para que los resultados del modelo reproduzcan variables de estado medidas en terreno.

El **proceso de calibración** se realiza inicialmente en estado estacionario y posteriormente en régimen transiente.

- **Régimen Permanente** → Transmisibilidad (T) o Conductividad Hidráulica (K)
- **Régimen Transiente** → Transmisibilidad (T), Conductividad Hidráulica (K), y Almacenamiento (S)



CALIBRACION

Parámetros de una Calibración:

FLUJO

- Conductividad Hidráulica
- Flujo a través de un acuitardo
- Coeficiente de almacenamiento

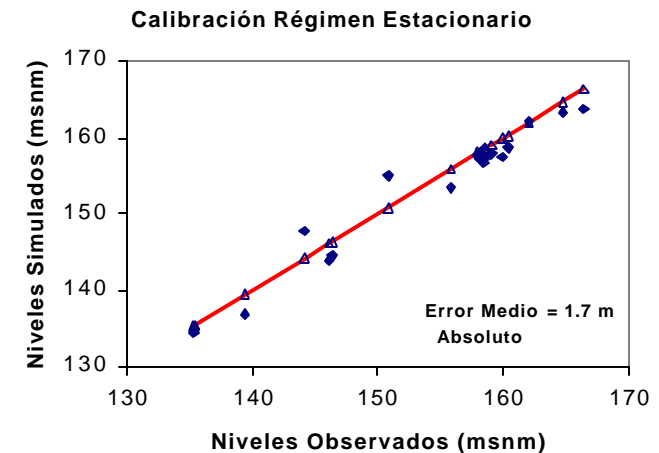
- Tasas de recarga
- Condiciones de borde



CALIBRACION

Objetivos de una Calibración:

- Sintetizar sistema natural
- Representar procesos
- Detectar y eliminar datos sesgados
- Desarrollar un modelo predictivo adecuado



Consideraciones Generales de la Calibración

- Observaciones específicas son inciertas y están sujetas a interpretación
- Necesidad de criterios de calibración cualitativos y cuantitativos
- Calibración no es única



CALIBRACION

•Criterios Cualitativos de una Calibración:

- Comparación de propiedades generales del flujo (dirección)
- Contornos de nivel piezométrico y/o profundidad
- Depresiones o elevaciones
- Descarga o recarga de agua superficial

•Norma ASTM D 5490 sobre un análisis de cuán razonables son las propiedades hidrogeológicas incluidas en la calibración

- Comparación con datos reales estimados o medidos directamente
- Rangos posibles para parámetros



CALIBRACION

•Criterios Cuantitativos de una Calibración:

- Comparación de valores medidos y simulados
- Cálculo de residuales

$$r = h(\text{calculado}) - h(\text{observado})$$

- Valor medio (R), valor absoluto (RA), raíz cuadrada del residual (RMS), desviación estándar (SD), valor normalizado (RN)
- Histogramas (comportamiento tipo gaussiano)
- Contornos de residuos
- Cálculo de balances volumétricos y flujos superficiales



CALIBRACION

•Criterios Cuantitativos de una Calibración:

-Valor medio (R) $\longrightarrow R = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n r_i$

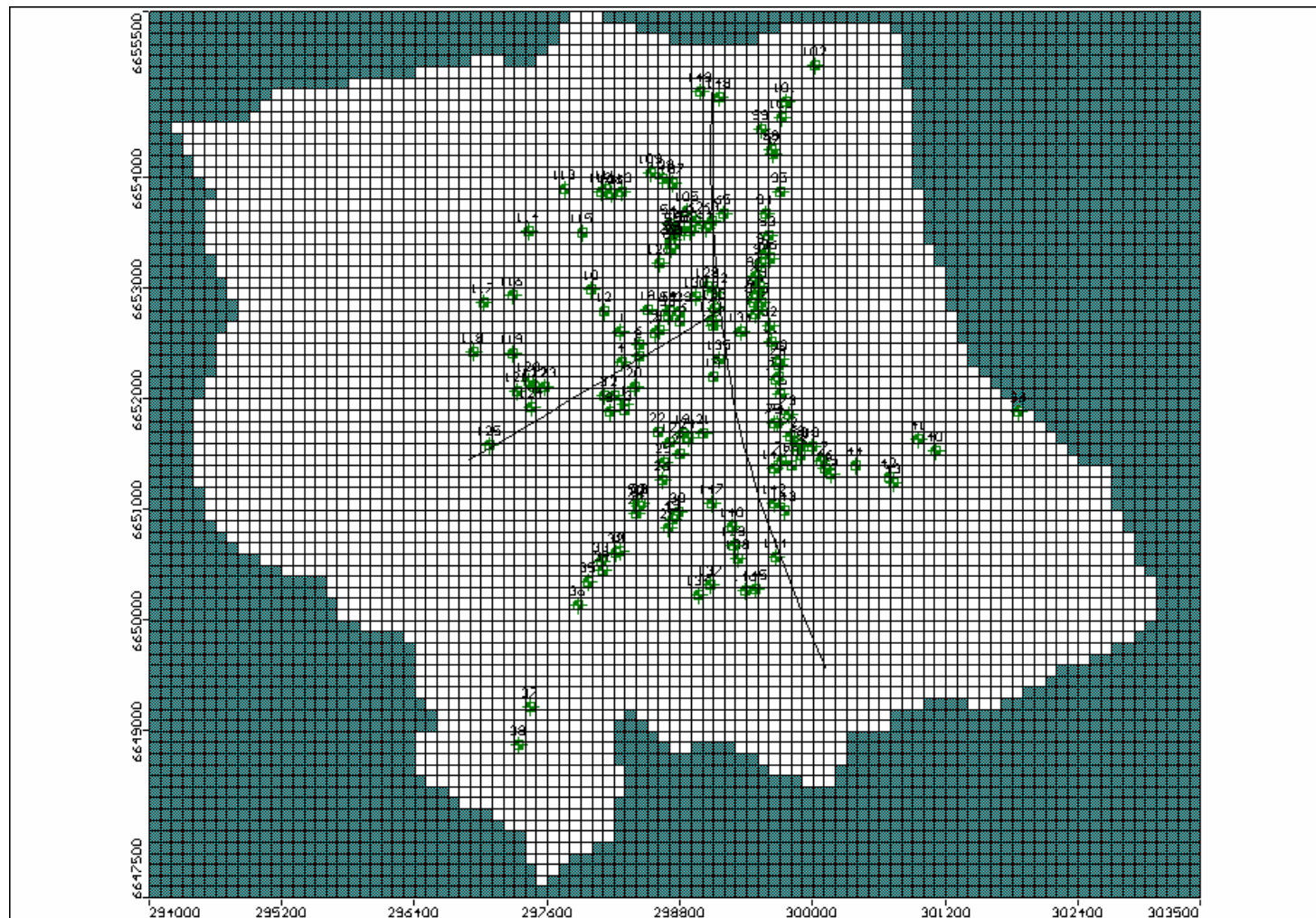
-Valor absoluto (RA) $\longrightarrow RA = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |r_i|$

-Raiz cuadrada del residual (RMS) $\longrightarrow RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n r_i^2}$

-Desviación estándar (SD) $\longrightarrow SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (r_i - R)^2}$

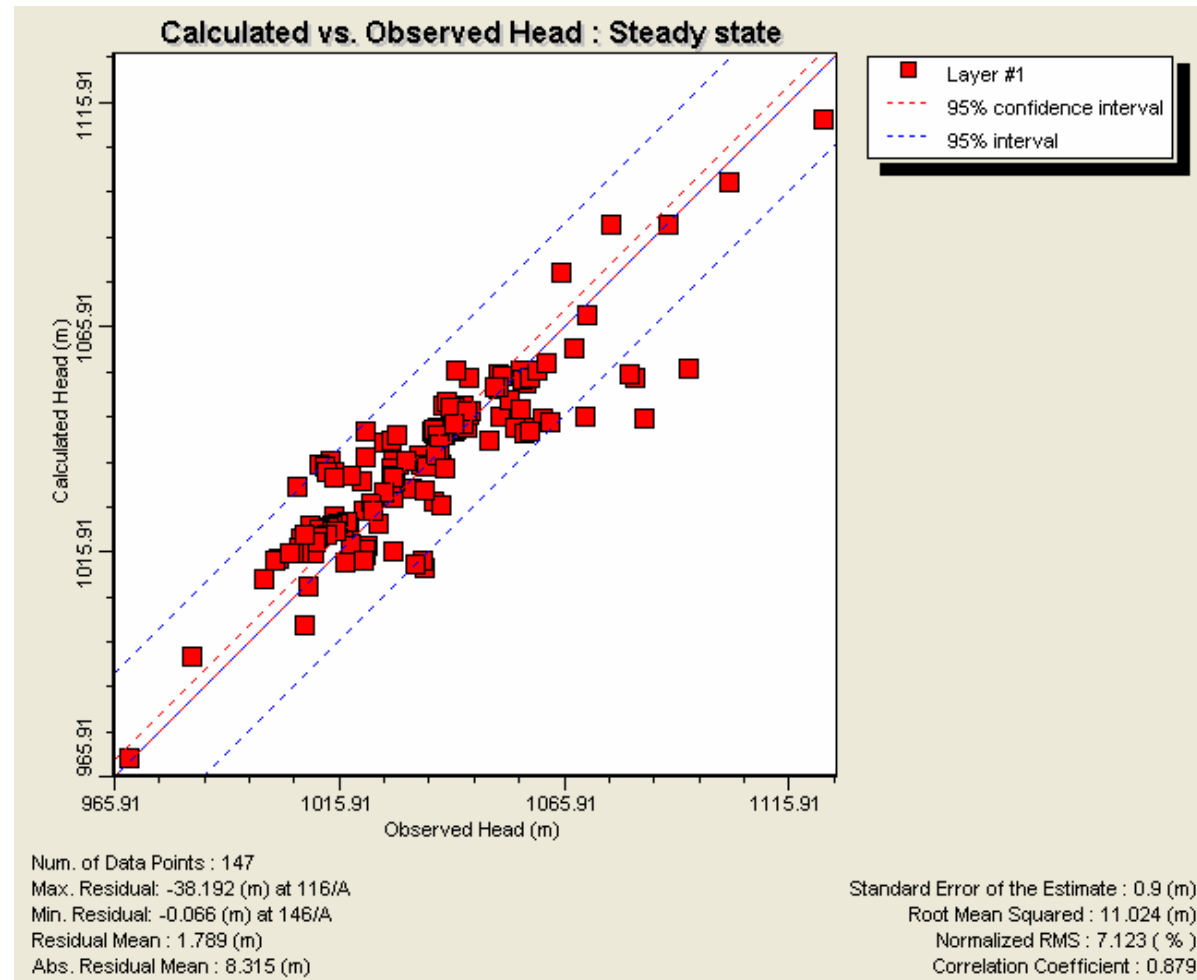
-Valor normalizado (RN) $\longrightarrow RN = \frac{RMS}{\max(H) - \min(H)}$



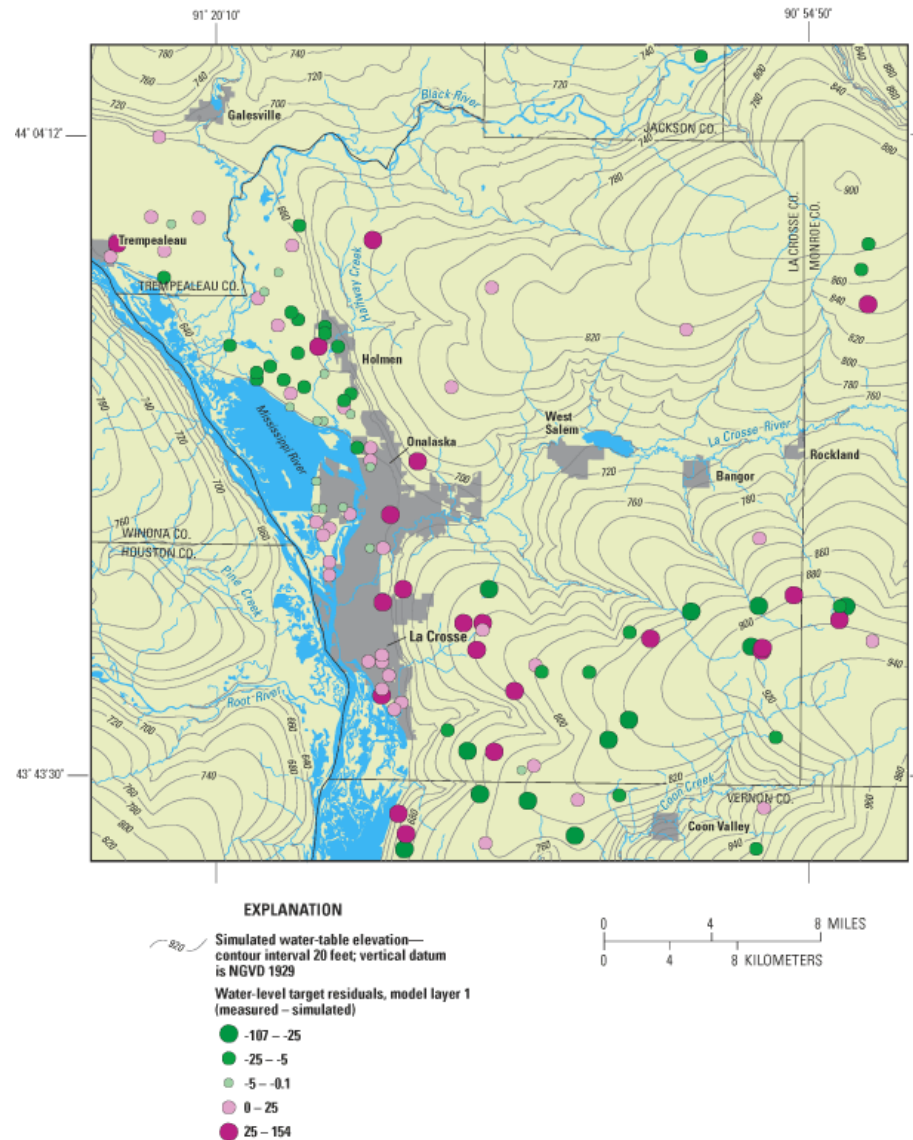


PASO 8

CALIBRATION



CALIBRACION



CALIBRACION

El **proceso de calibración** puede ser realizado de dos formas diferentes:

–**Prueba y error**: esta es la metodología tradicional y consiste en operar el modelo con diferentes parámetros, los que son variados a **criterio** del “modelador”, hasta encontrar un ajuste **razonable** entre valores medidos y simulados.

–**Esquema automático**: el ajuste o estimación de los parámetros se realiza en forma automática por parte de un módulo independiente del programa, el que utiliza nociones de optimización (PEST). Utiliza una función objetivo que es minimizada.

$$FO = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |r_i|$$

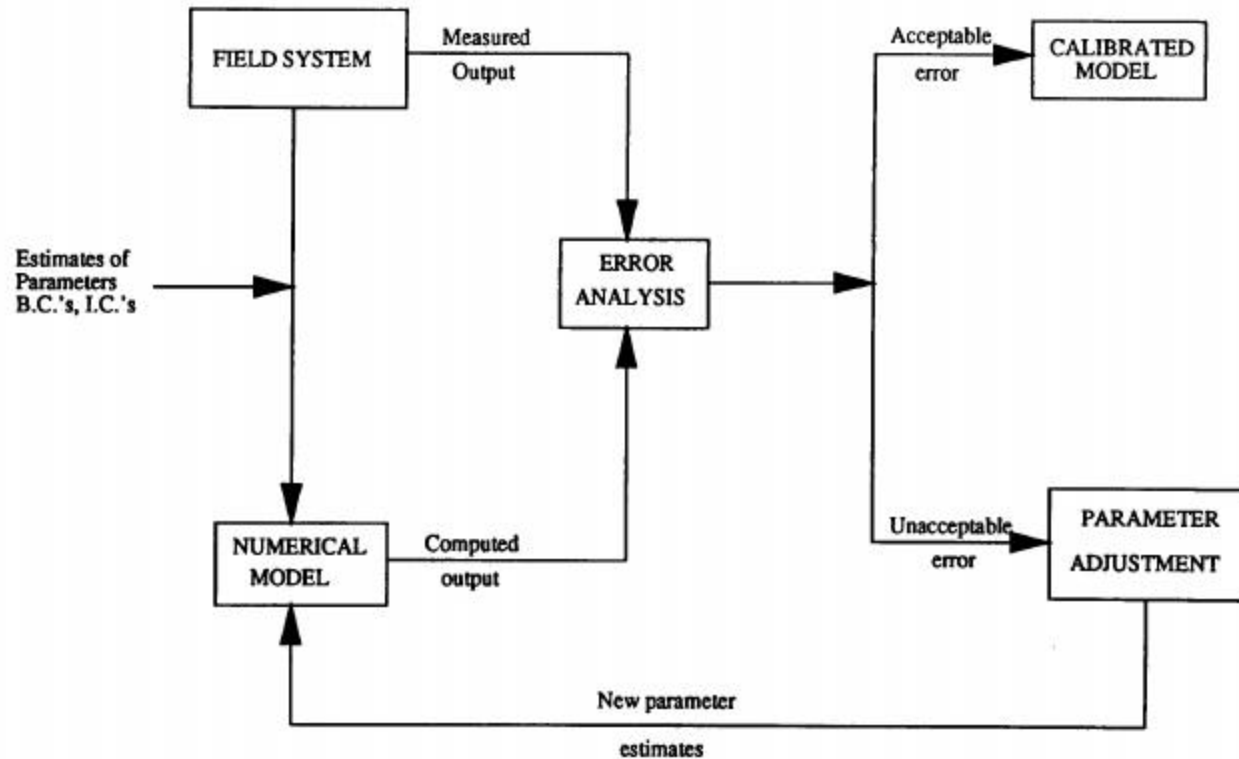
Rango de parámetros se define por cada usuario.

PASO 8



CALIBRACION

Esquema automatizado para calibración se indica en diagrama adjunto.



PASO 8



CALIBRACION

Calibración no es única:

Más de una combinación de parámetros provee un razonable ajuste de los datos observado.

VALIDACION!!!!

¿Cuál es el efecto de pequeñas variaciones en los datos de entrada?

ANALISIS DE SENSIBILIDAD!!!!



VALIDACION

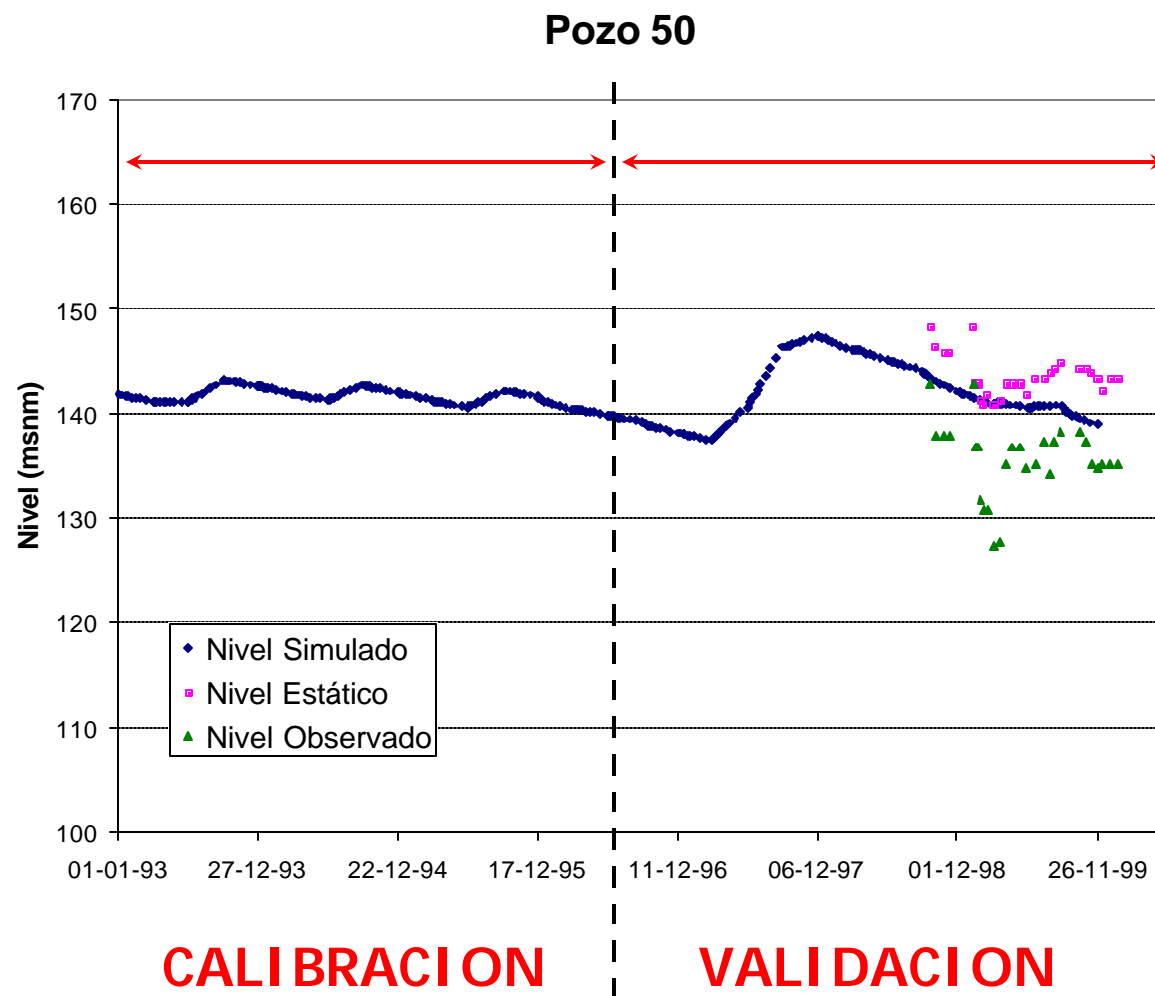
En el **proceso de validación** se opera el modelo con los parámetros determinados en la etapa de calibración y se verifica la reproducción de datos históricos.

Una vez calibrado el modelo debe ser utilizado para “simular” un segundo conjunto de datos conocidos. El modelo debe ser capaz de reproducir estos valores, de otro modo su validez es cuestionable.

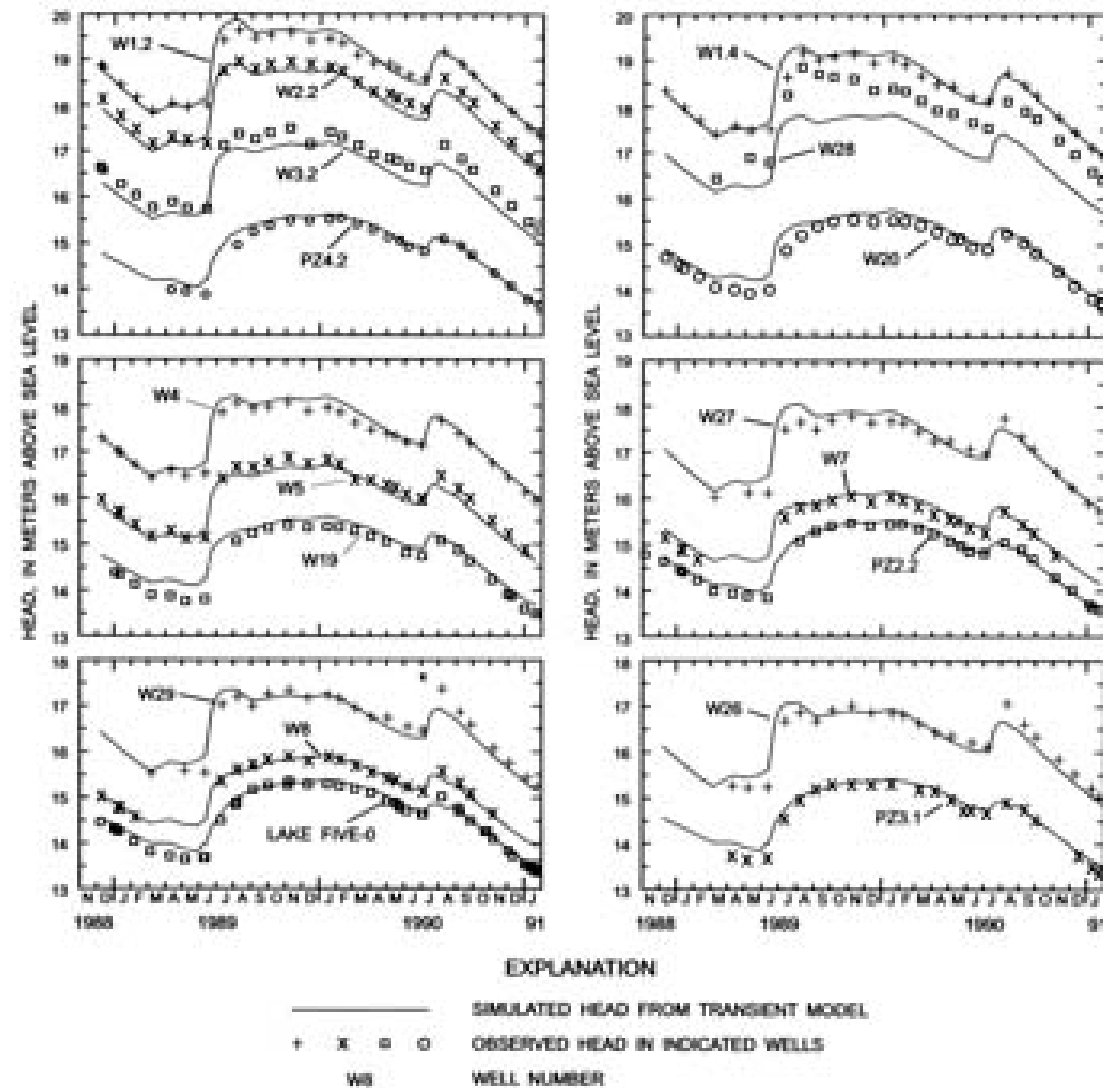
Calibrar en la estación seca (verano) y validar en la estación húmeda (invierno).



VALIDACION



VALIDACION



ANALISIS DE SENSIBILIDAD

Luego de completar el modelo hidrogeológico se debe realizar un análisis de sensibilidad del modelo, para lo cual se debe analizar los siguientes aspectos:

- ¿Son los supuestos del modelo válidos?
- ¿Son razonables los datos básicos utilizados?
- ¿Cuál es el efecto de pequeñas variaciones en los datos de entrada?
- ¿Se puede defender el modelo?



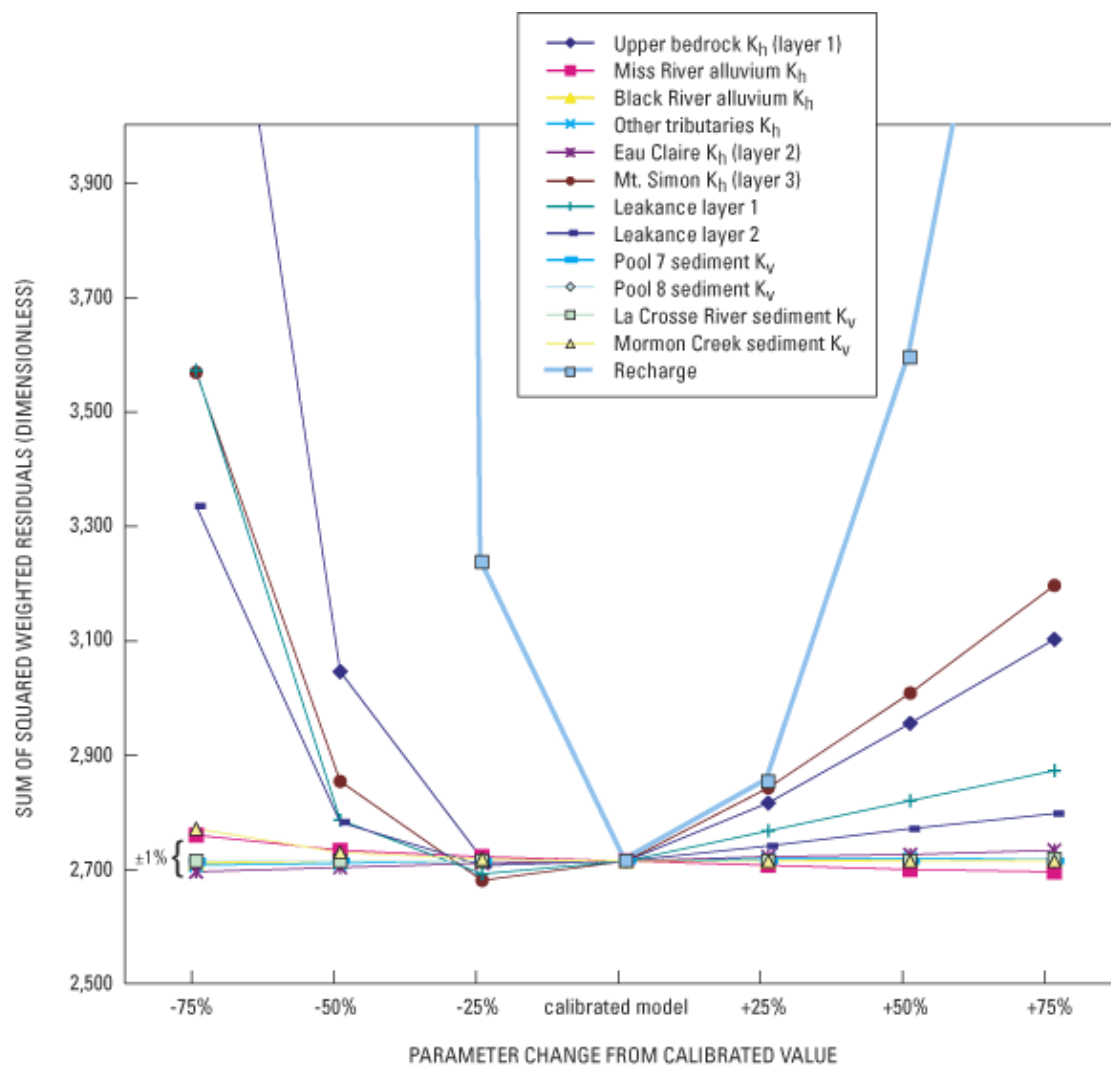
ANALISIS DE SENSIBILIDAD

Algunos objetivos de este análisis de sensibilidad se indican a continuación:

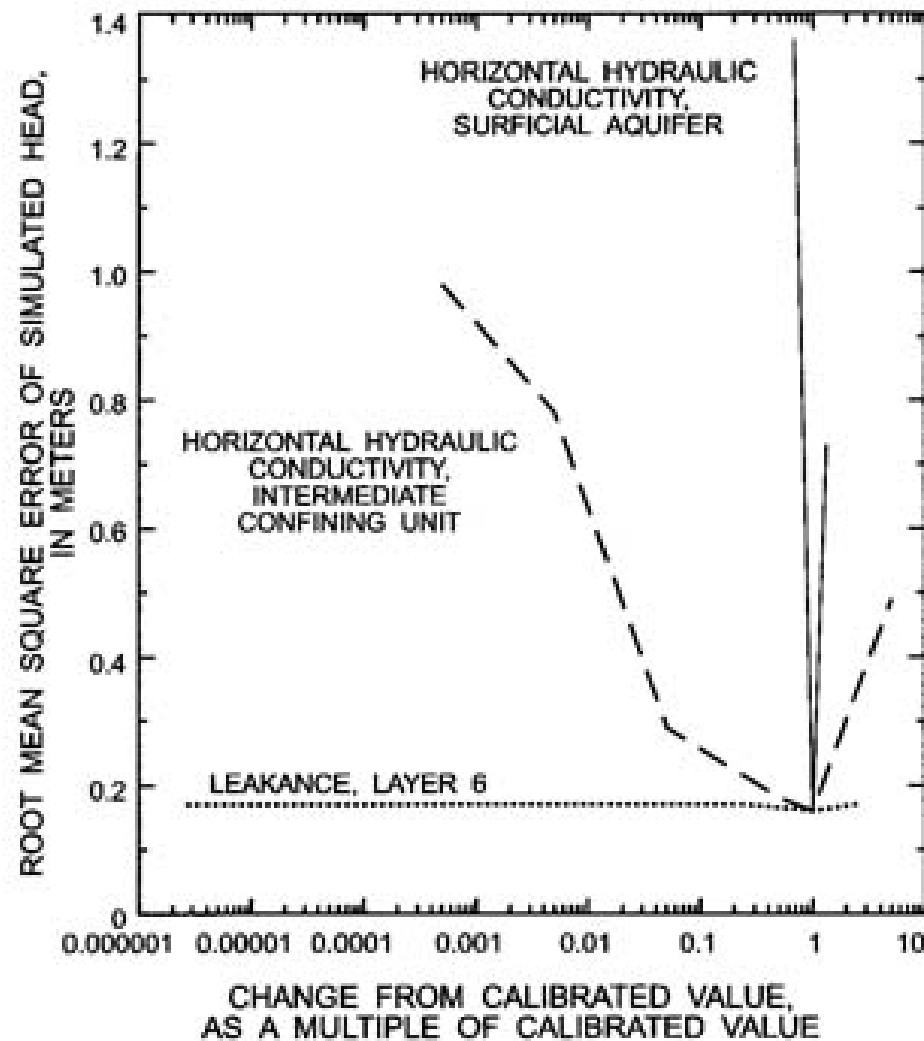
- Predecir tendencias y direcciones de cambio de determinadas variables de estado
- Generar información sobre sensibilidad del sistema a cambios en determinados parámetros (incorporar más recursos en su determinación)
- Aumentar conocimiento del sistema y de los fenómenos de interés que son relevantes



ANALISIS DE SENSIBILIDAD



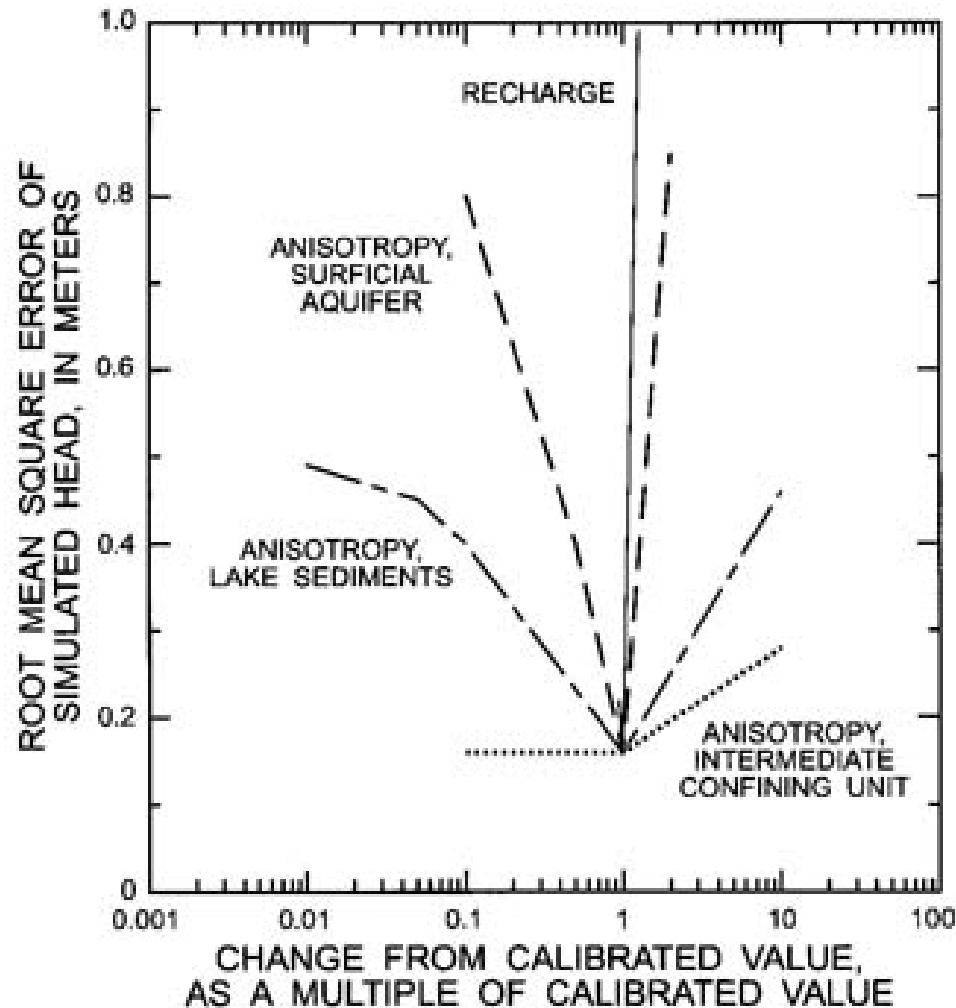
ANALISIS DE SENSIBILIDAD



$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (r_i - R)^2}$$



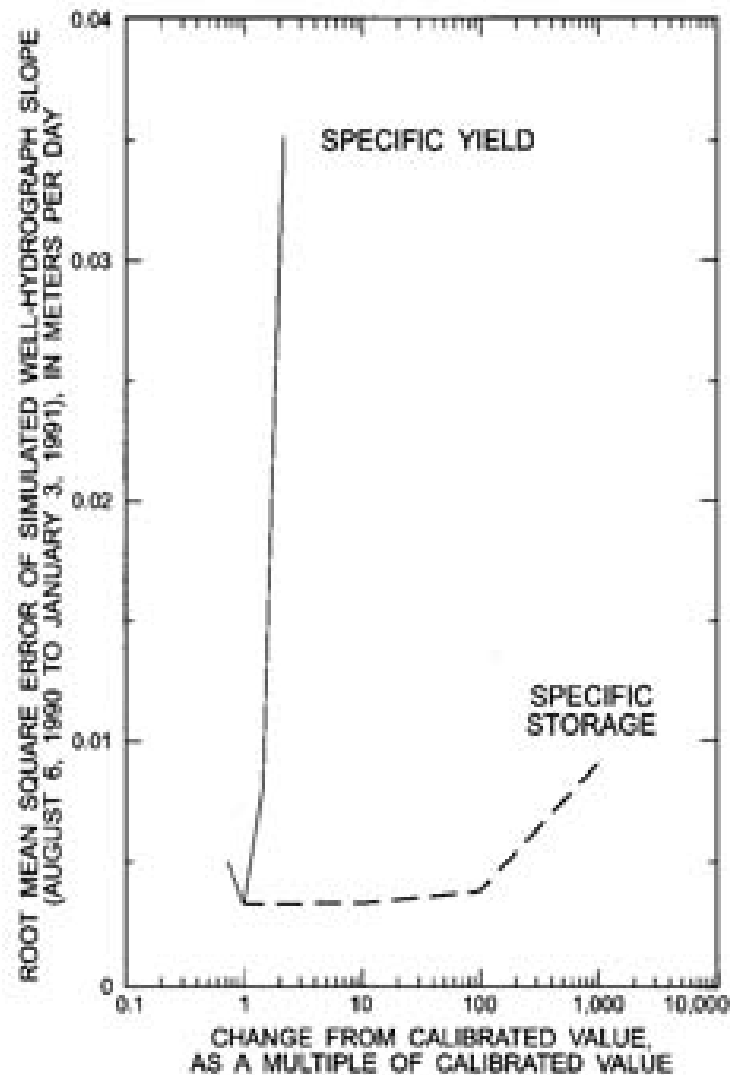
ANALISIS DE SENSIBILIDAD



$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (r_i - R)^2}$$



ANALISIS DE SENSIBILIDAD

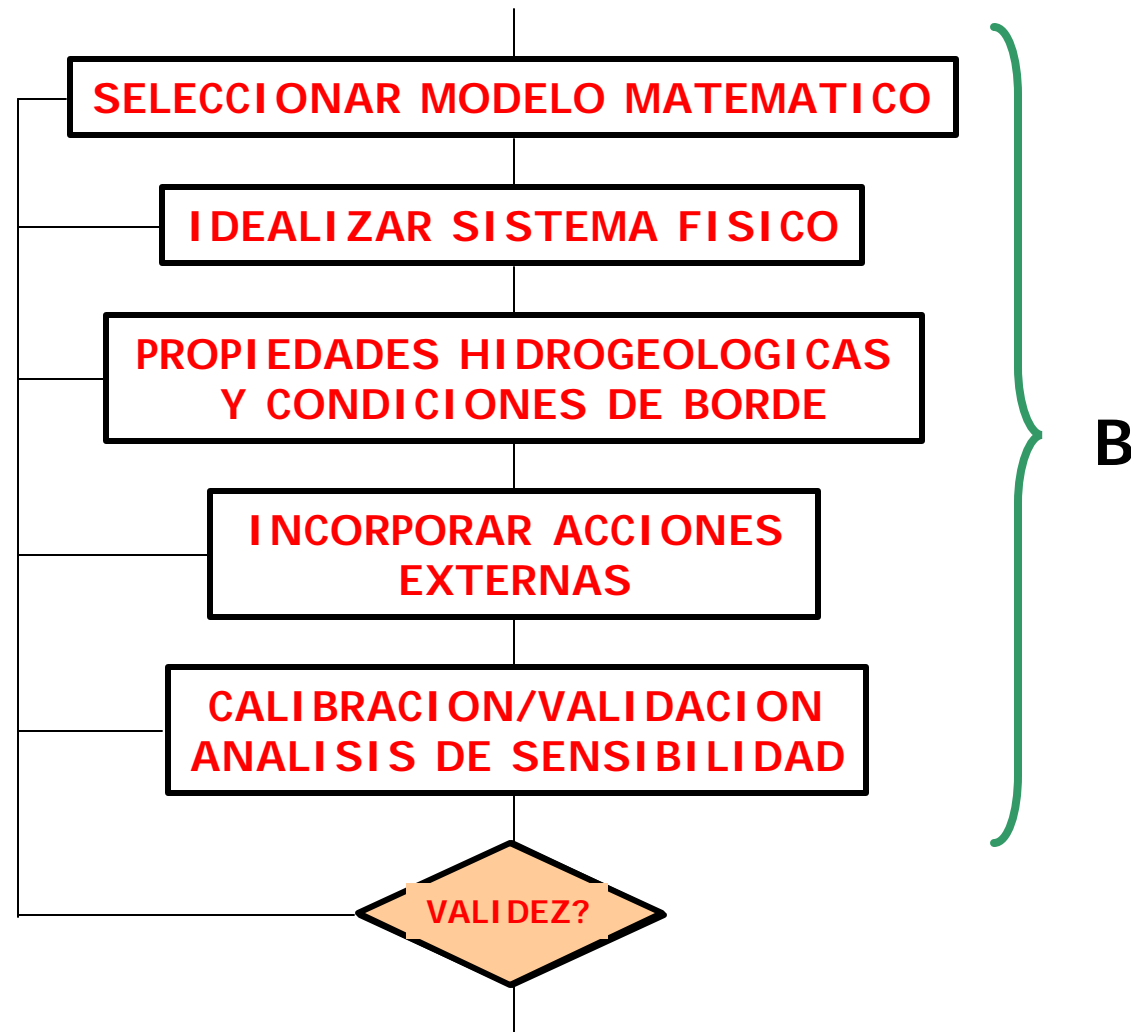


$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (r_i - R)^2}$$

PASO 8



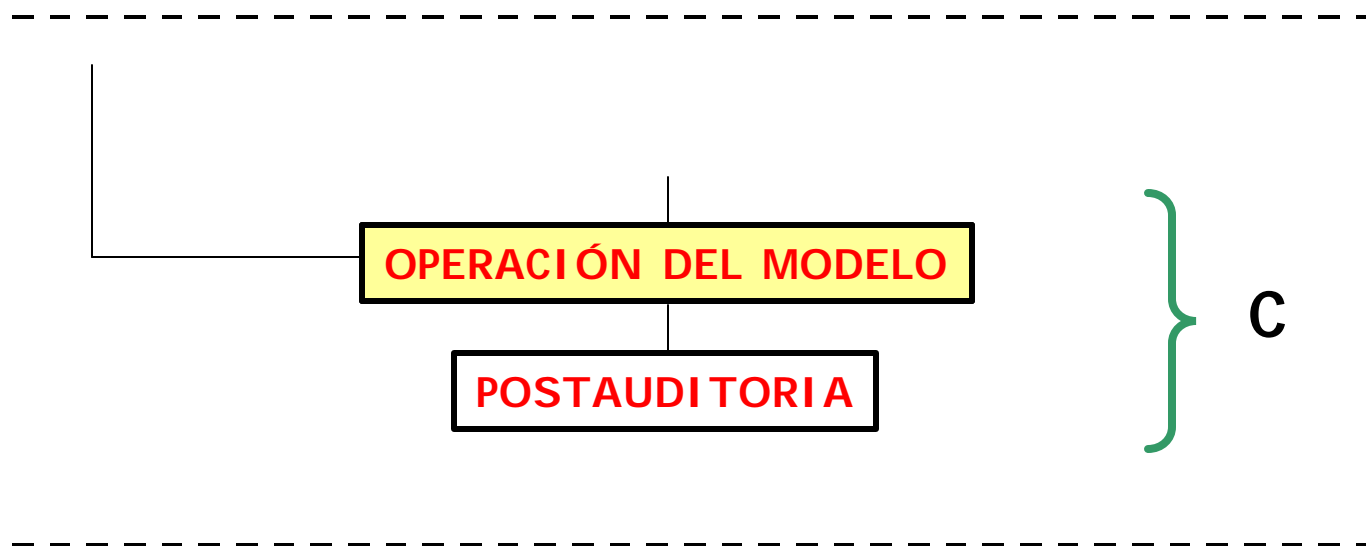
ETAPA B: MODELO HIDROGEOLOGICO



- **INTRODUCCION**
- **ETAPAS EN LA CONSTRUCCION DE UN MODELO DE SIMULACION HIDROGEOLOGICO**
 - **ETAPA A: MODELO CONCEPTUAL**
 - **ETAPA B: MODELO HIDROGEOLOGICO**
 - **ETAPA C: USO Y POSTAUDITORIA**
- **CONCLUSIONES**



ETAPA C: USO Y POSTAUDITORIA



OPERACIÓN DEL MODELO

Luego de completar el Modelo Hidrogeológico (ETAPA B) se lo puede utilizar para evaluar diferentes situaciones de interés que se identificaron en la etapa inicial.

Situaciones de interés:

- escenarios hidrológicos secos, medios y húmedos
- aumento de uso de recursos hídricos
- cambios en tecnologías de riego
- urbanización



OPERACIÓN DEL MODELO

Para incorporar el efecto de la incerteza de los datos sobre los resultados del Modelo Hidrogeológico (ETAPA B) se pueden utilizar diversas estrategias:

- Predicción con base en la mejor estimación de parámetros

Se usa el modelo con el conjunto de parámetros más confiable. No permite comprender el tema de la incerteza.

- Predicción con base en el peor escenario.

Se utiliza el modelo con un conjunto de parámetros muy conservadores. La diferencia entre este escenario y el anterior permitirá analizar la magnitud de la incerteza.

- Análisis probabilístico

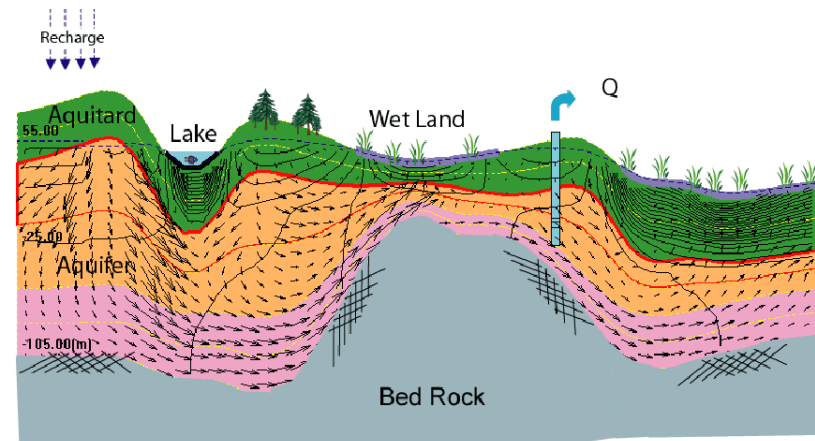
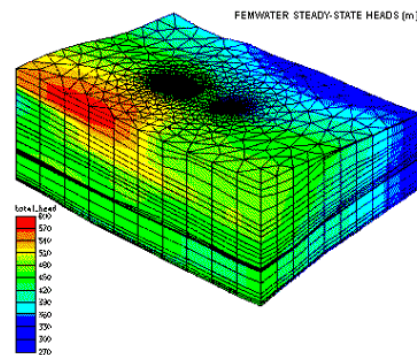
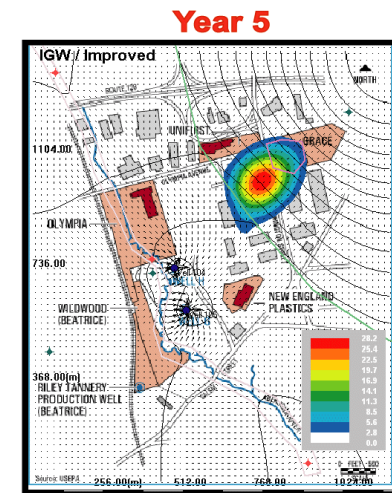
Se describe los diversos parámetros con funciones de distribución de probabilidad. El resultado de este análisis entrega el escenario más probable (promedio) y su posible incerteza (varianza).



OPERACIÓN DEL MODELO

Resultados de un Modelo Hidrogeológico:

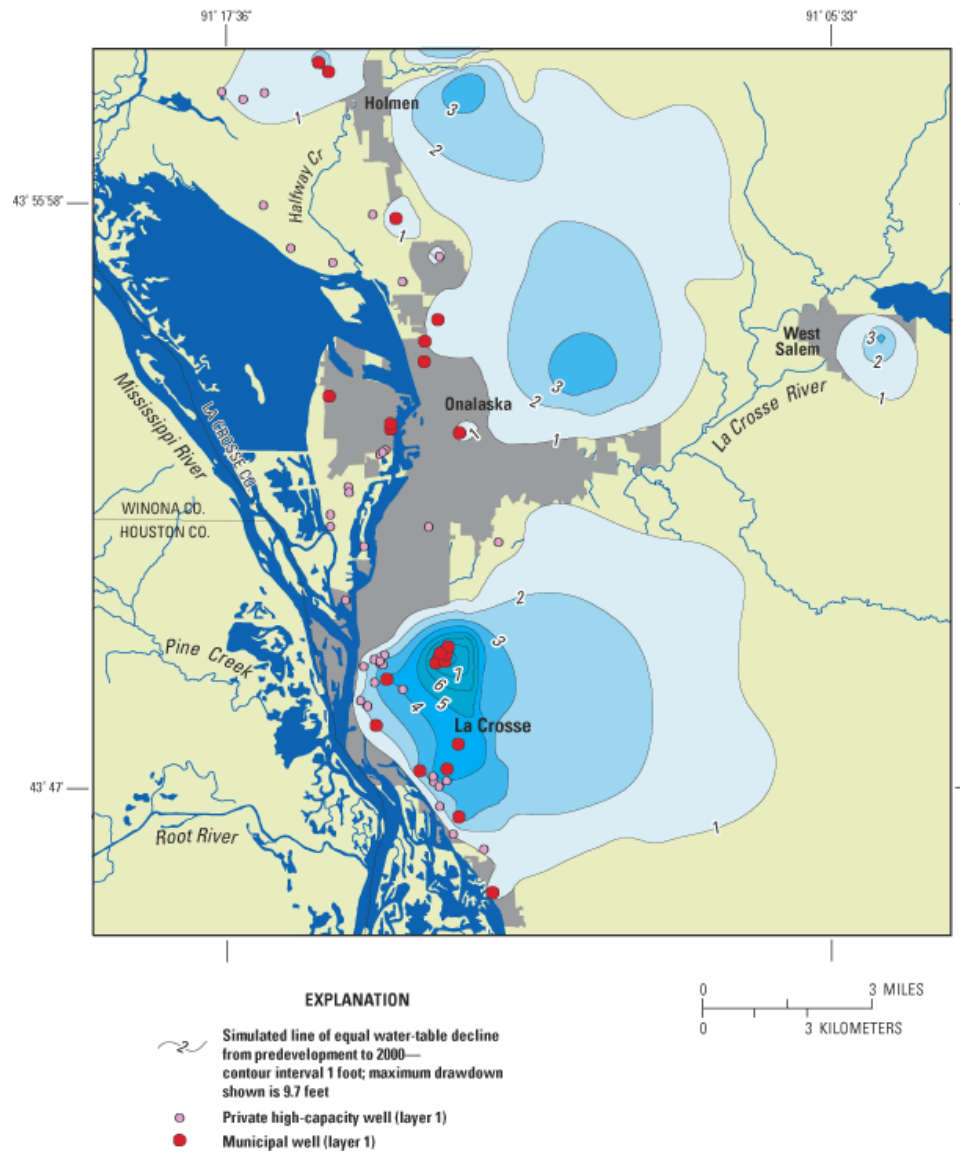
- Niveles de agua o piezométricos en cada celda
- Concentración de un compuesto contaminante
- Mapas de contorno (equipotenciales, descensos, concentraciones)
- Flujos y velocidades
- Trayectorias de partículas
- Zonas de captura



PASO 9

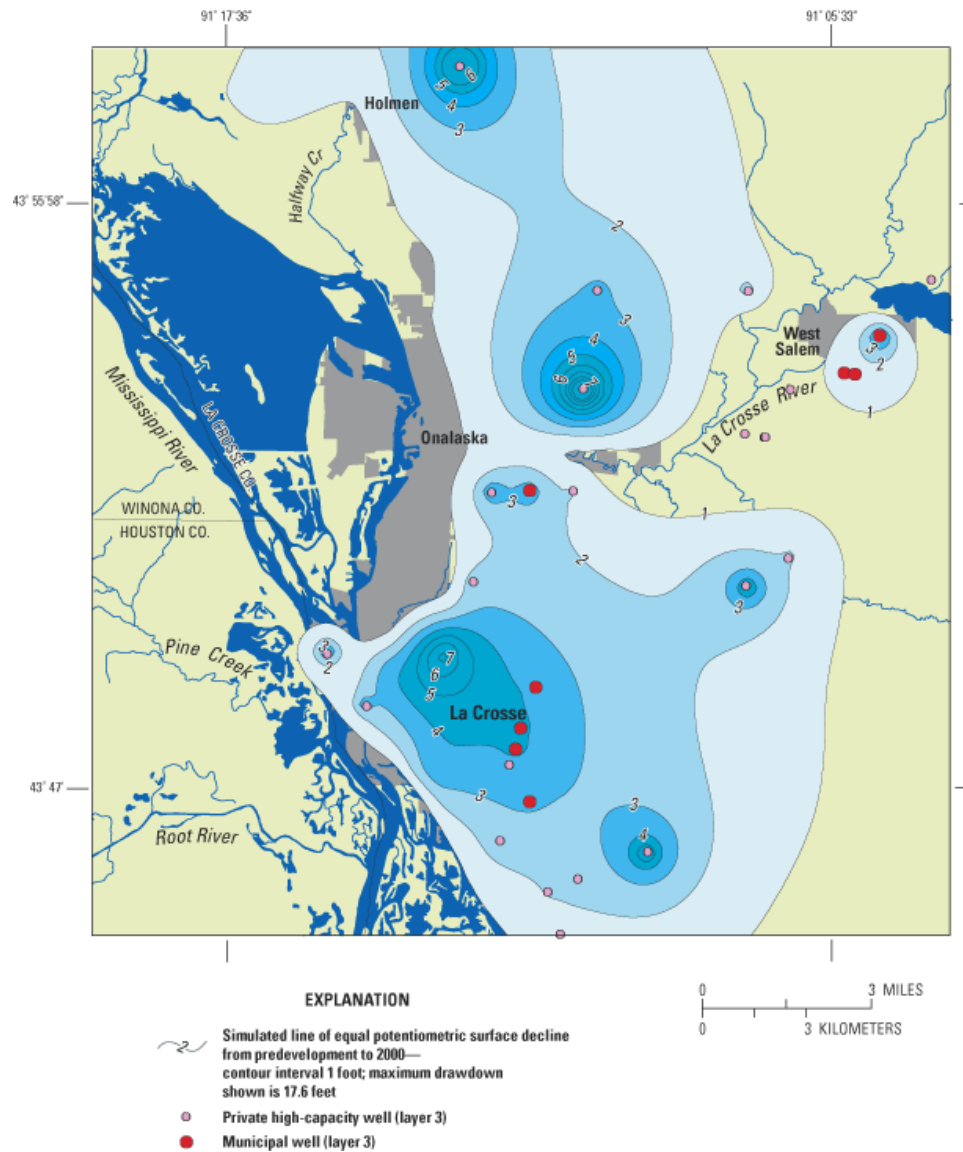


OPERACIÓN DEL MODELO



PASO 9

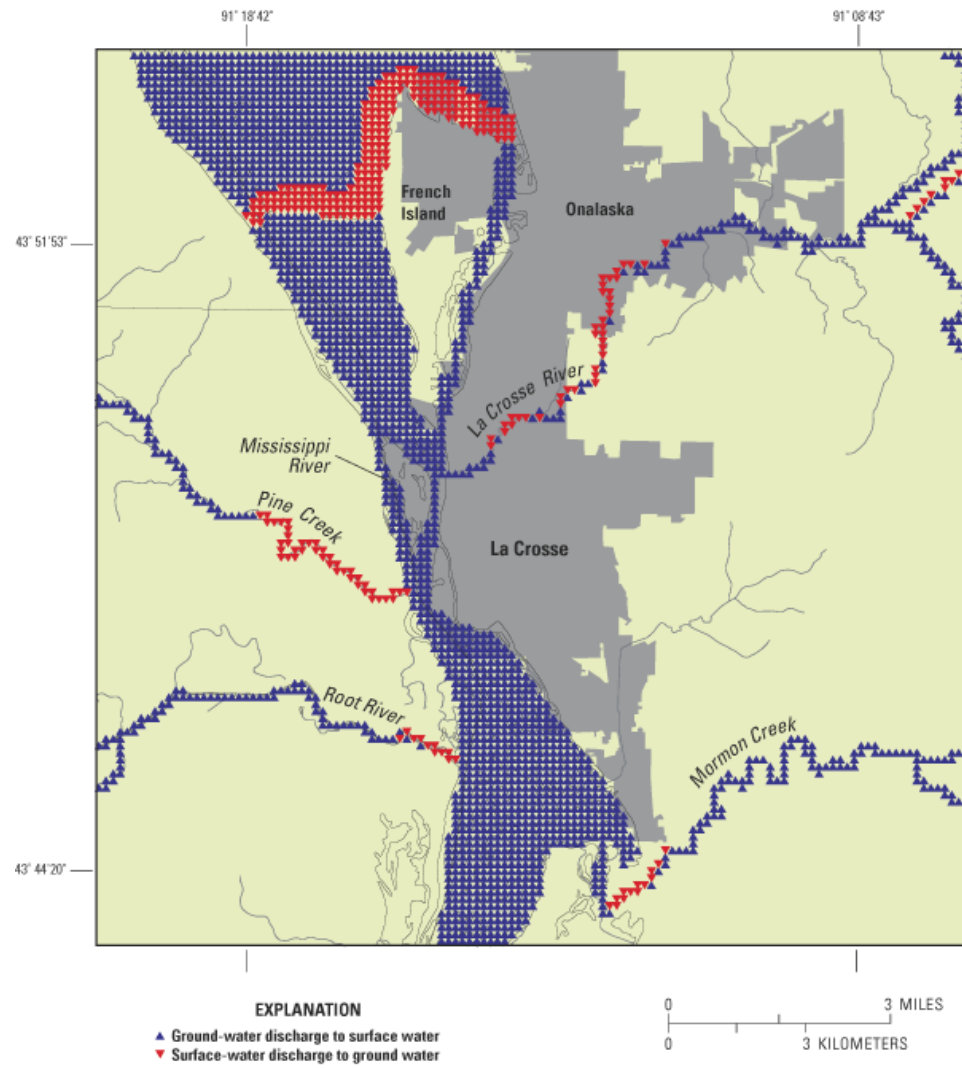
OPERACIÓN DEL MODELO



PASO 9



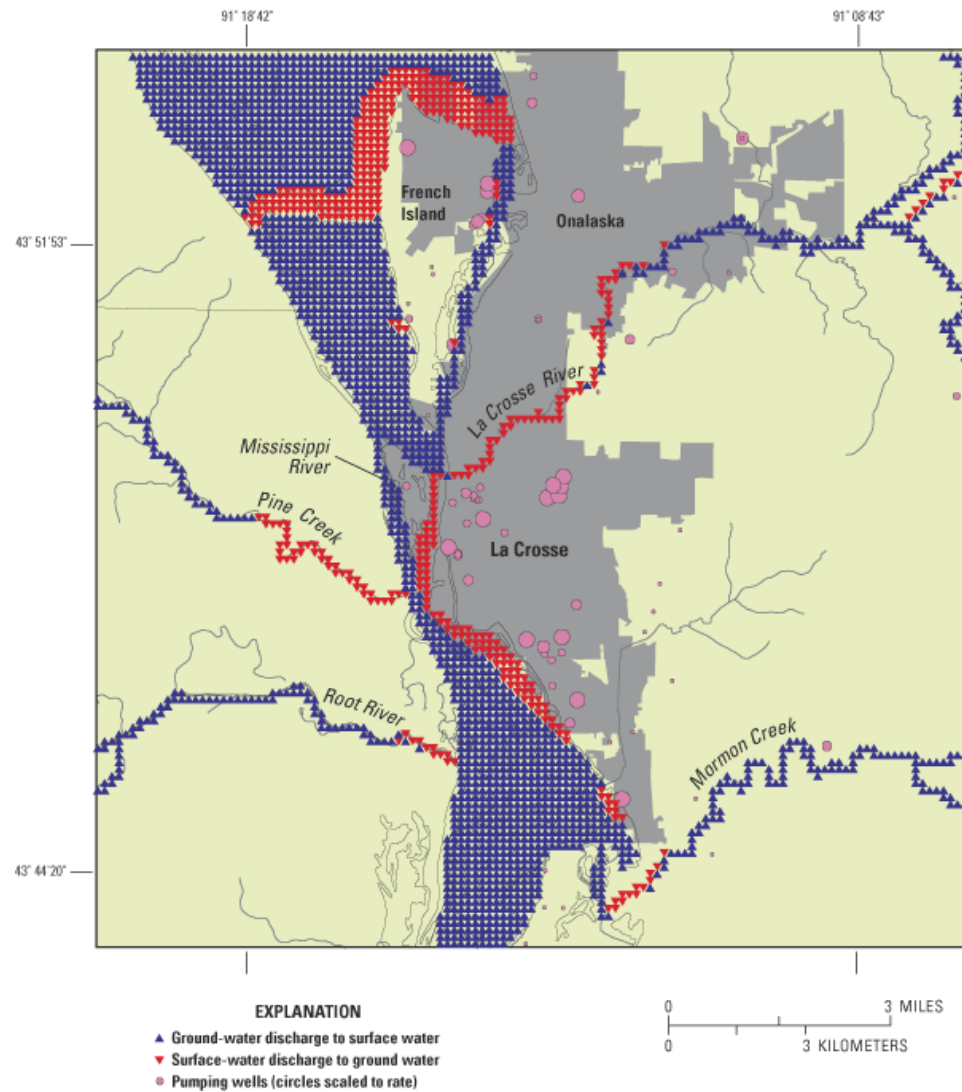
OPERACIÓN DEL MODELO



PASO 9



OPERACIÓN DEL MODELO



PASO 9



OPERACIÓN DEL MODELO

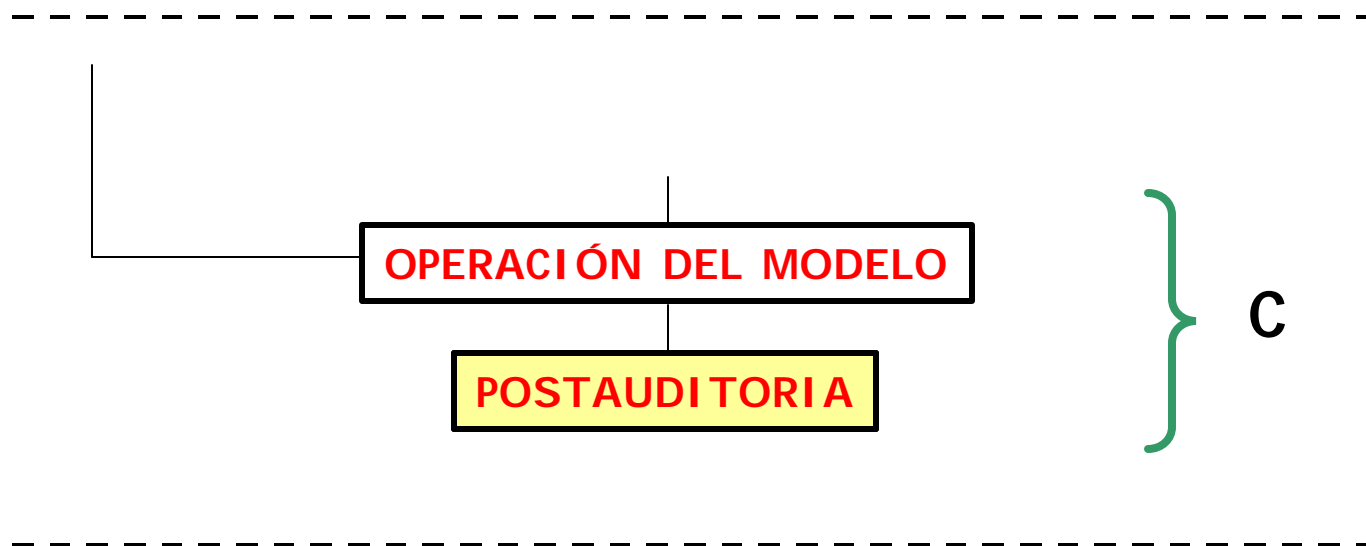
Ultimo paso en la operación del modelo hidrogeológico es la documentación del mismo.

Secciones que componen el documento de reporte para un Modelo Hidrogeológico se indican a continuación:

- TITULO
- INFORMACION BASICA Y DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA
- MODELO CONCEPTUAL
- DISEÑO DE MODELO Y RESULTADOS
- LIMITACIONES DEL MODELO
- RESUMEN Y CONCLUSIONES



ETAPA C: USO Y POSTAUDITORIA



POSTAUDITORIA

Este proceso implica el continuo chequeo o comparación de los resultados del modelo y mediciones de determinadas variables de estado.

Lo anterior permitirá “recalibrar” el modelo en la medida que información más nueva indique que existen cambios en los parámetros que inicialmente se utilizaron o estimaron para este modelo.

La etapa de postauditoria ofrece la oportunidad de estudiar la naturaleza y magnitud de los errores predictivos de un modelo.



POSTAUDITORIA

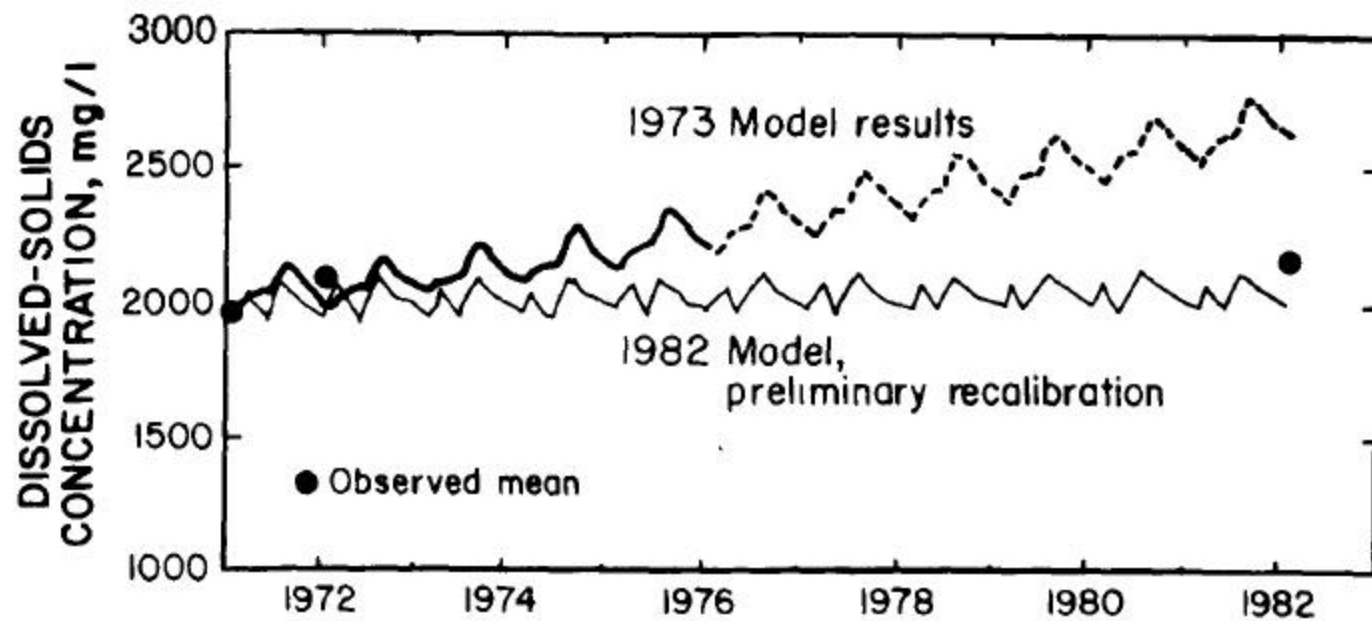
Estudios de postauditoría reportados de manera pública indican las siguientes conclusiones:

- Predicciones inexactas fueron causadas parcialmente por errores en el modelo conceptual del sistema hidrogeológico.
- Predicciones inexactas son productos del uso de valores inadecuados para los "stresses" futuros del sistema hidrogeológico.



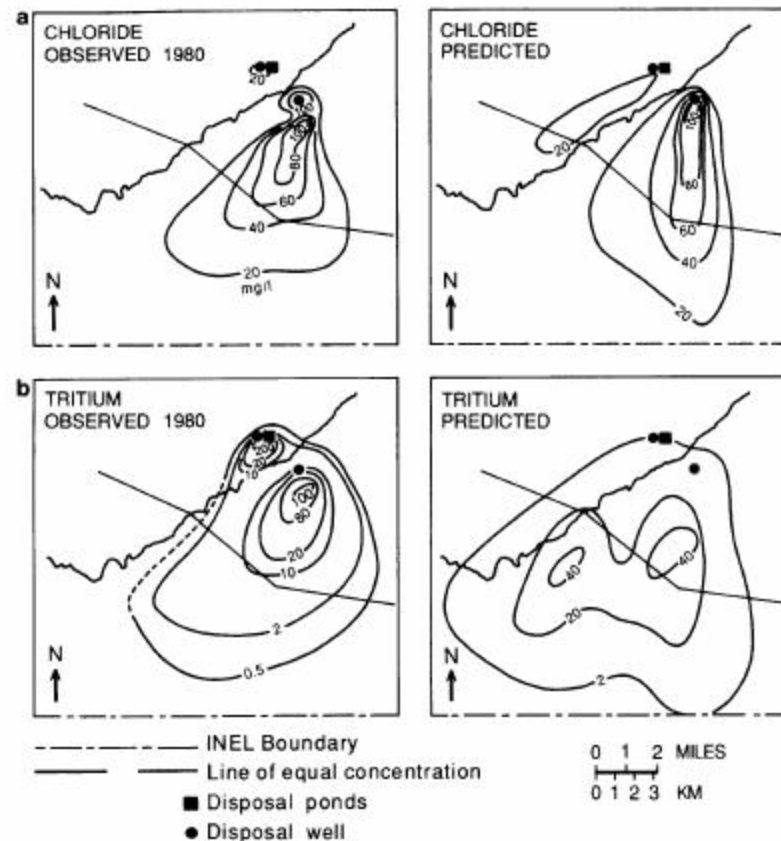
POSTAUDITORIA

Problema de transporte de contaminantes operado el año 1973 y recalibrado en 1982 (Río Arkansas).



POSTAUDITORIA

Problema de transporte de contaminantes operado el año 1974 y reanalizado en 1982 (Idaho National Engineering Laboratory).



- **INTRODUCCION**
- **ETAPAS EN LA CONSTRUCCION DE UN MODELO DE SIMULACION HIDROGEOLOGICO**
 - ETAPA A: MODELO CONCEPTUAL
 - ETAPA B: MODELO HIDROGEOLOGICO
 - ETAPA C: USO Y POSTAUDITORIA
- **CONCLUSIONES**



CONCLUSIONES

Los modelos de simulación son herramientas muy poderosas para el manejo y gestión de las aguas subterráneas. Un modelo no reproduce la realidad, sólo permite realizar estimaciones o análisis comparativos de comportamientos posibles.

Dependen de datos de terreno, percepciones del "modelador" y de un modelo conceptual coherente.

Escoger en forma adecuada los límites del modelo y las condiciones de borde.

Hacer predicciones conservadoras.



CONCLUSIONES

Las discrepancias entre las respuestas observadas y calculadas de un sistema son una manifestación de errores en el modelo hidrogeológico. Existen tres fuentes de error:

- Errores conceptuales**: eliminación de procesos relevantes o no consideración de efectos dimensionales (2D o 3D?)
- Errores numéricos**: errores de truncación, errores de redondeo y dispersión numérica.
- Errores de datos**: incertezas y deficiencias en datos básicos reflejan la imposibilidad de describir en forma precisa y única los diferentes parámetros, acciones externas.



USO Y ROL DE MODELOS HIDROGEOLOGICOS

