

CI66J

CI66J/CI71T MODELACION DE AGUAS SUBTERRANEAS

PROCESOS DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN AGUAS SUBTERRANEAS



CI66J

INTRODUCCION

FUENTES DE CONTAMINACION

GENERALIDADES

CARACTERISTICAS

CATEGORIAS

PROCESOS DE TRANSPORTE DE MASAS

DERIVACION ECUACION DE TRANSPORTE

EC. ADVECCION-DISPERSION

SOLUCIONES ANALITICAS 1D

SOLUCIONES ANALITICAS 2D

EC. ADVECCION-DISPERSION-REACCION

REACCION DE PRIMER ORDEN

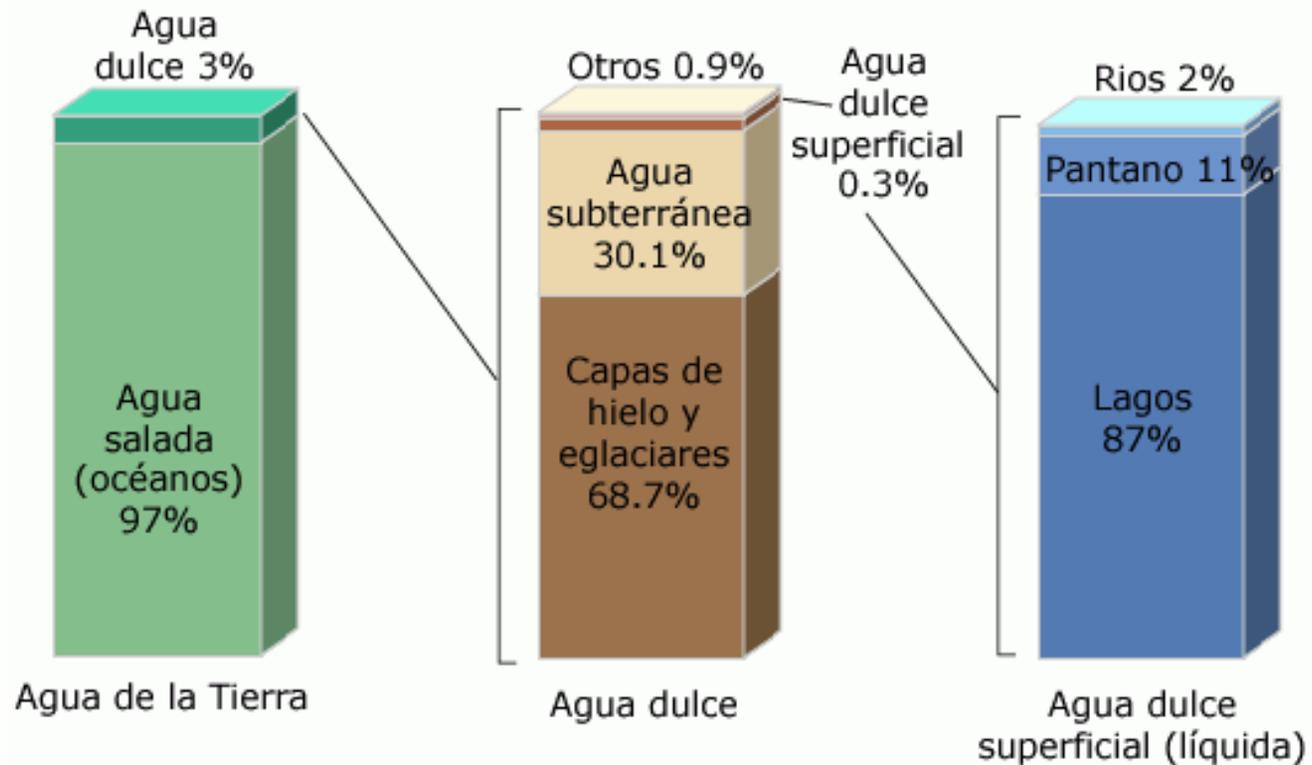
DETERMINACION DE DISPERSIVIDAD



INTRODUCCION

- Aguas superficiales ampliamente explotadas y cada vez más escasas. Recursos hídricos subterráneos atractivos para satisfacer demanda.

Distribución global del agua



INTRODUCCION

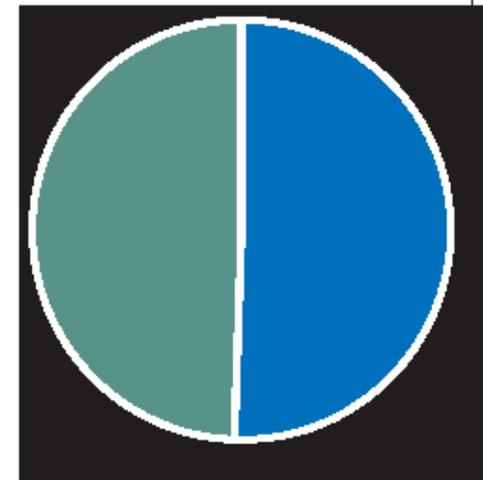
- Capacidad total de producción de captaciones de agua potable en Chile es de 88.7 m³/s.
- Aguas subterráneas ~50% del agua potable urbana.

Gráfico N°19

Producción de agua cruda a plena capacidad por tipo de fuente

Fuentes subterráneas **51%**

SISS (2004)



Fuentes superficiales **49%**



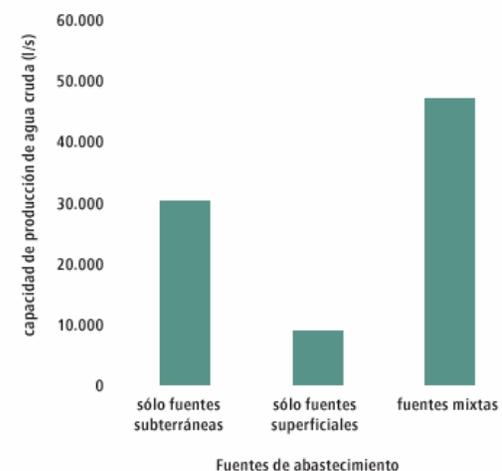
INTRODUCCION

- Importancia de las aguas subterráneas en el sector sanitario chileno: de 293 servicios o sistemas, 62.5% se abastecen únicamente con recursos subterráneos, 22.5% con recursos superficiales y el 15.0% con recursos mixtos.
- En ámbito rural, más del 77% del consumo total.

SISS (2004)



Gráfico N°20
Producción nacional por tipo de fuente



CI66J

INTRODUCCION

FUENTES DE CONTAMINACION

GENERALIDADES

CARACTERISTICAS

CATEGORIAS

PROCESOS DE TRANSPORTE DE MASAS

DERIVACION ECUACION DE TRANSPORTE

EC. ADVECCION-DISPERSION

SOLUCIONES ANALITICAS 1D

SOLUCIONES ANALITICAS 2D

EC. ADVECCION-DISPERSION-REACCION

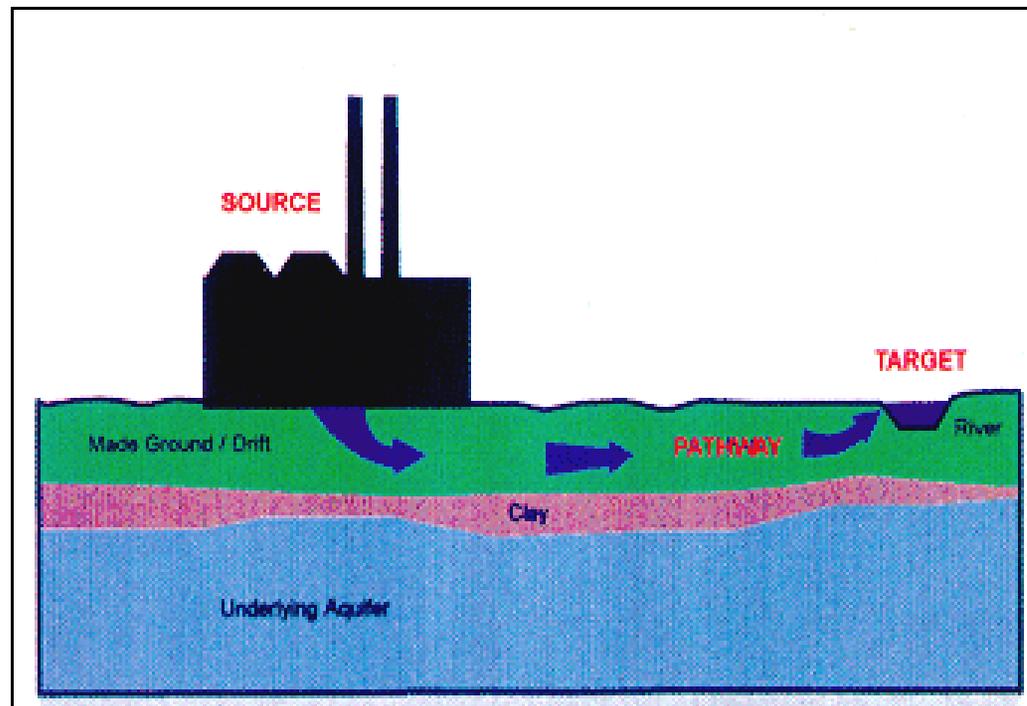
REACCION DE PRIMER ORDEN

DETERMINACION DE DISPERSIVIDAD

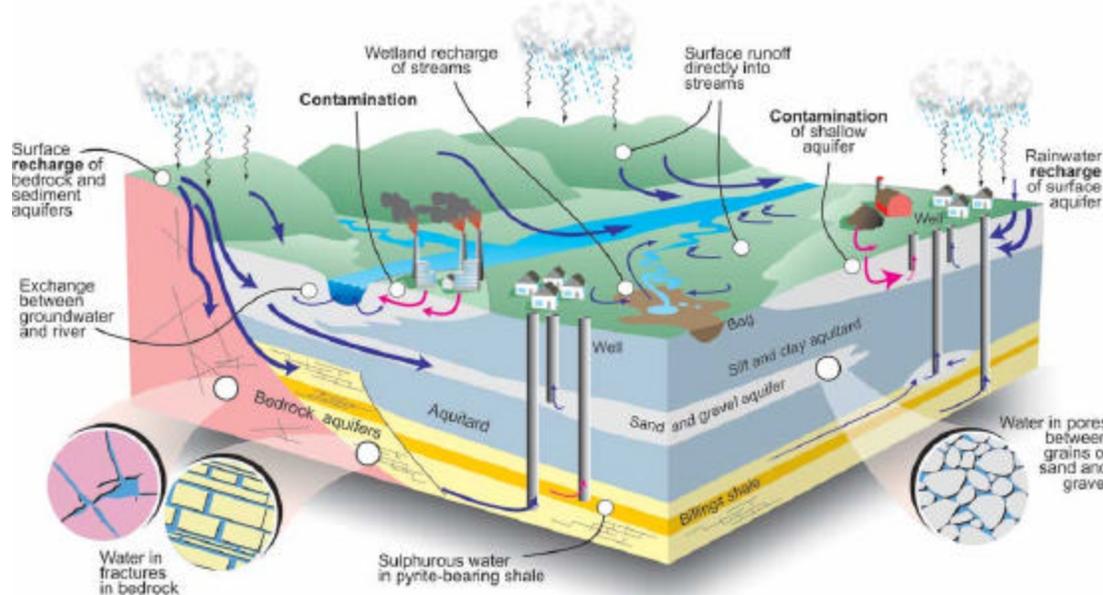
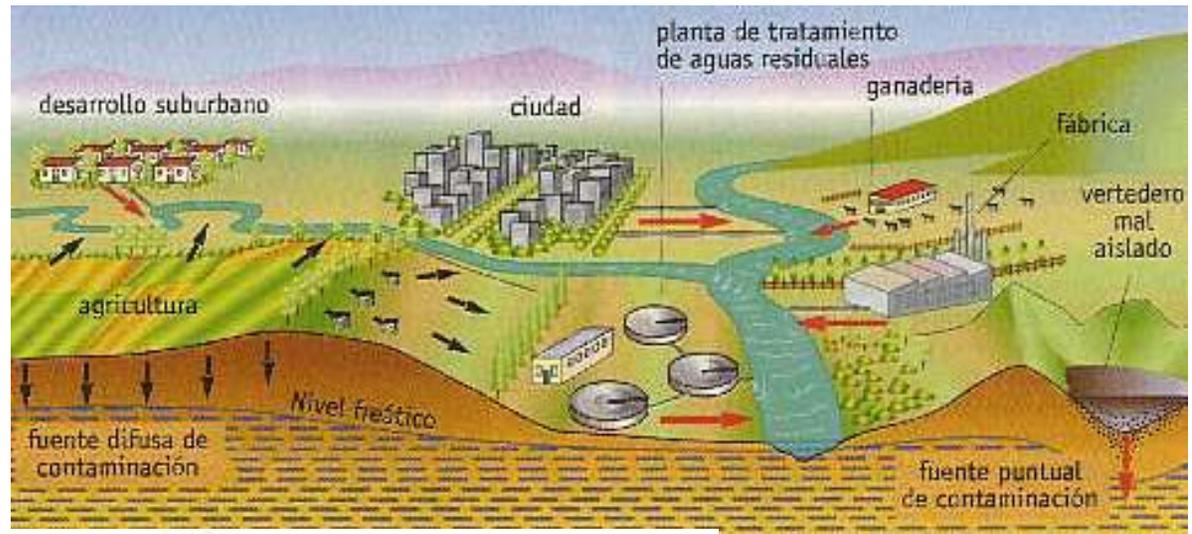


CI66J

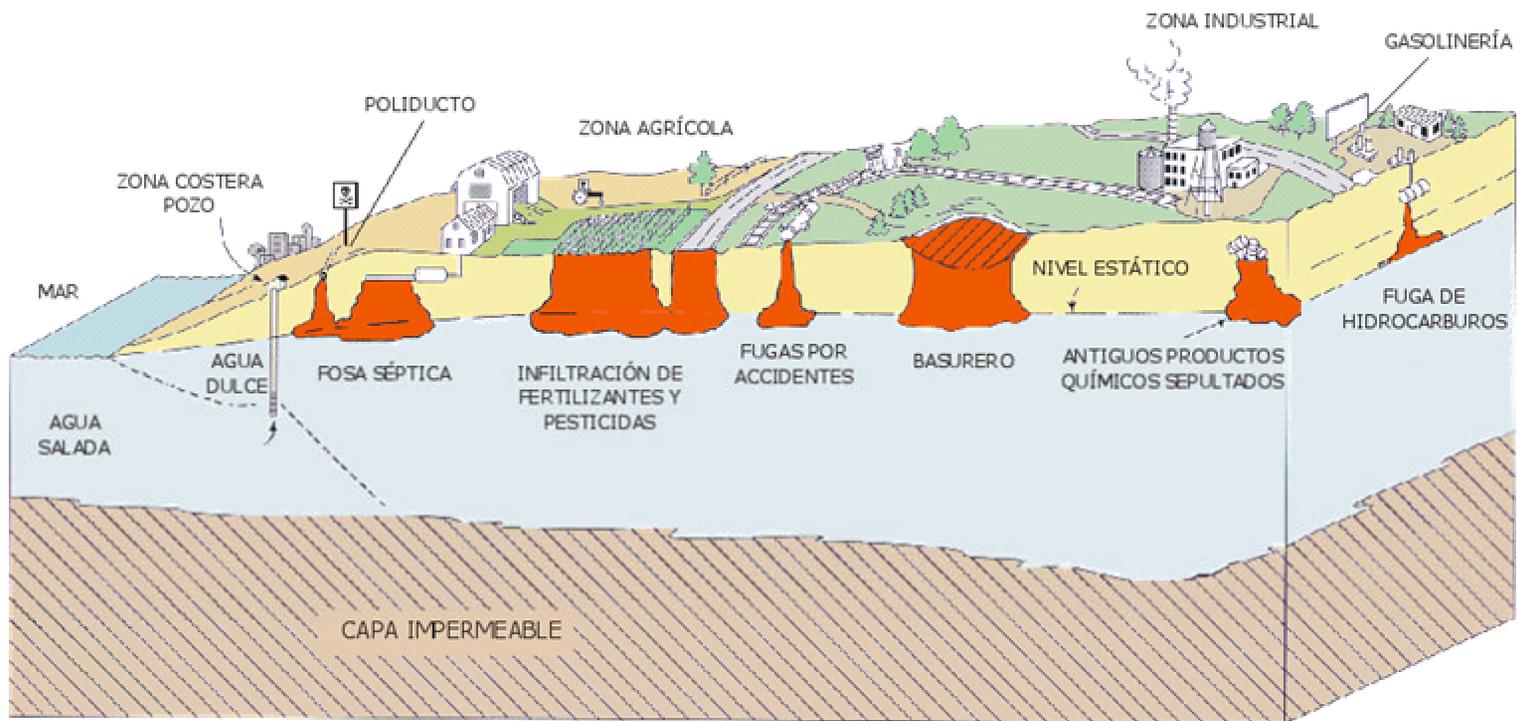
El estudio de la contaminación de recursos hídricos subterráneos es de suma importancia tanto en lo que se refiere a las posibles fuentes de contaminación como a los procesos de transporte de estos contaminantes en sistemas acuíferos.



FUENTES COMUNES DE CONTAMINACIÓN



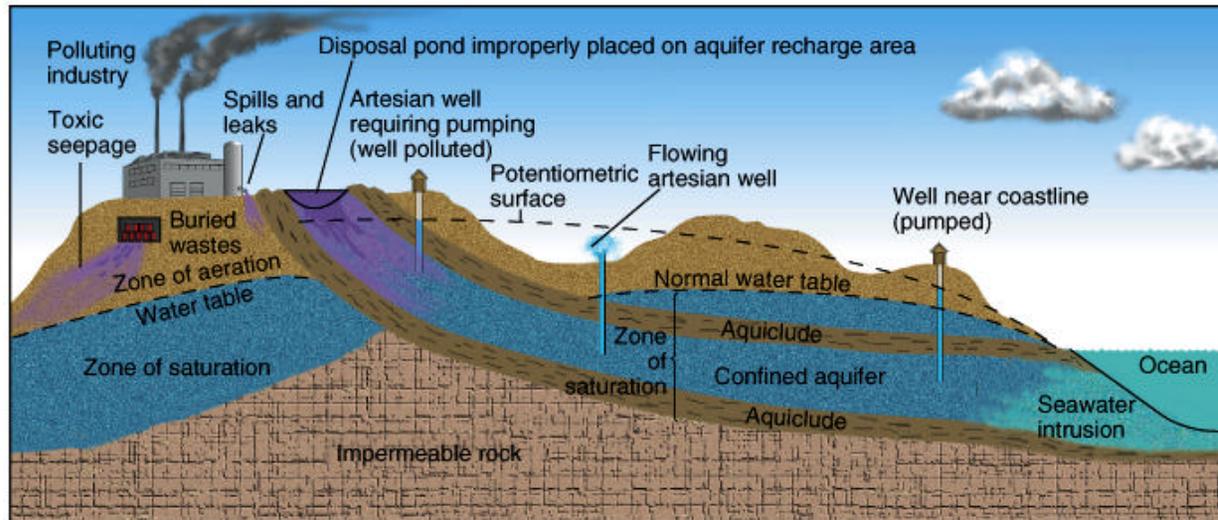
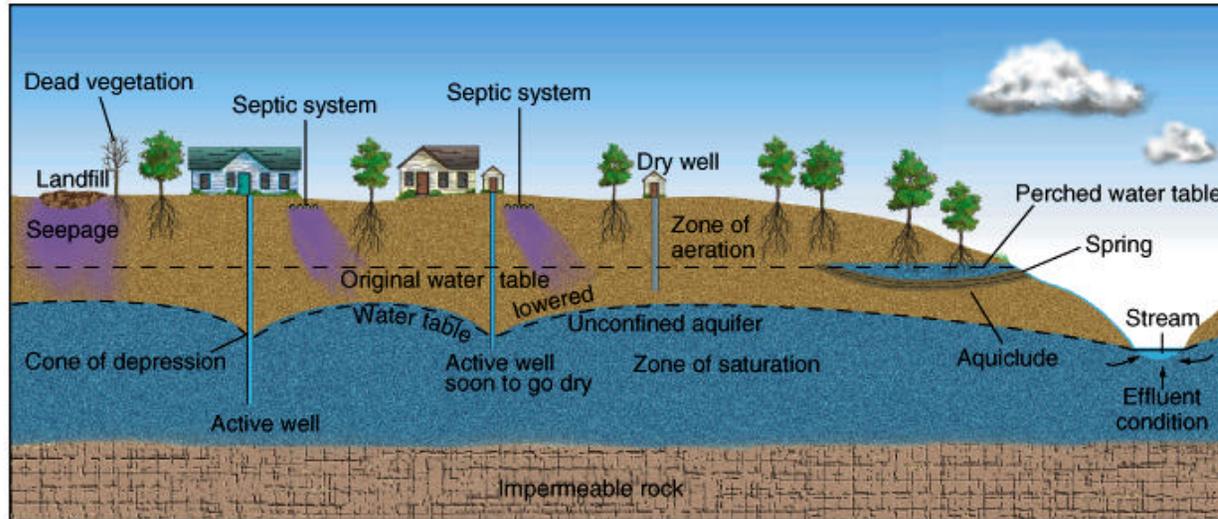
FUENTES COMUNES DE CONTAMINACIÓN



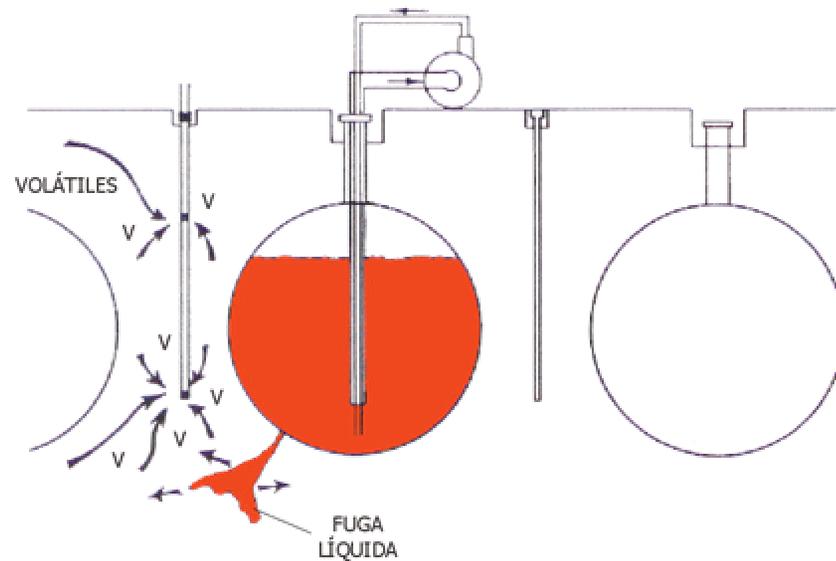
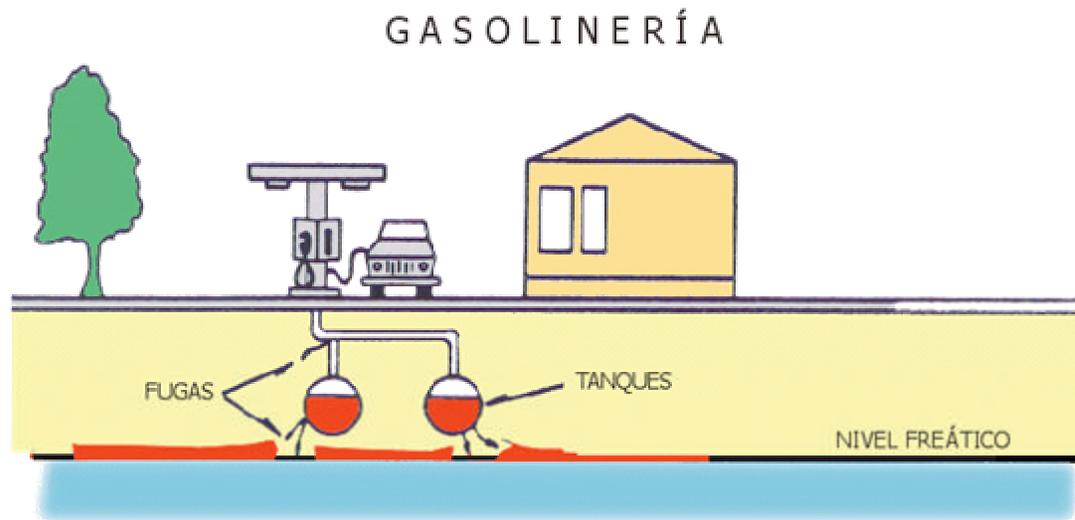
MODIFICADA DE: Fetter, 1993.



FUENTES COMUNES DE CONTAMINACIÓN



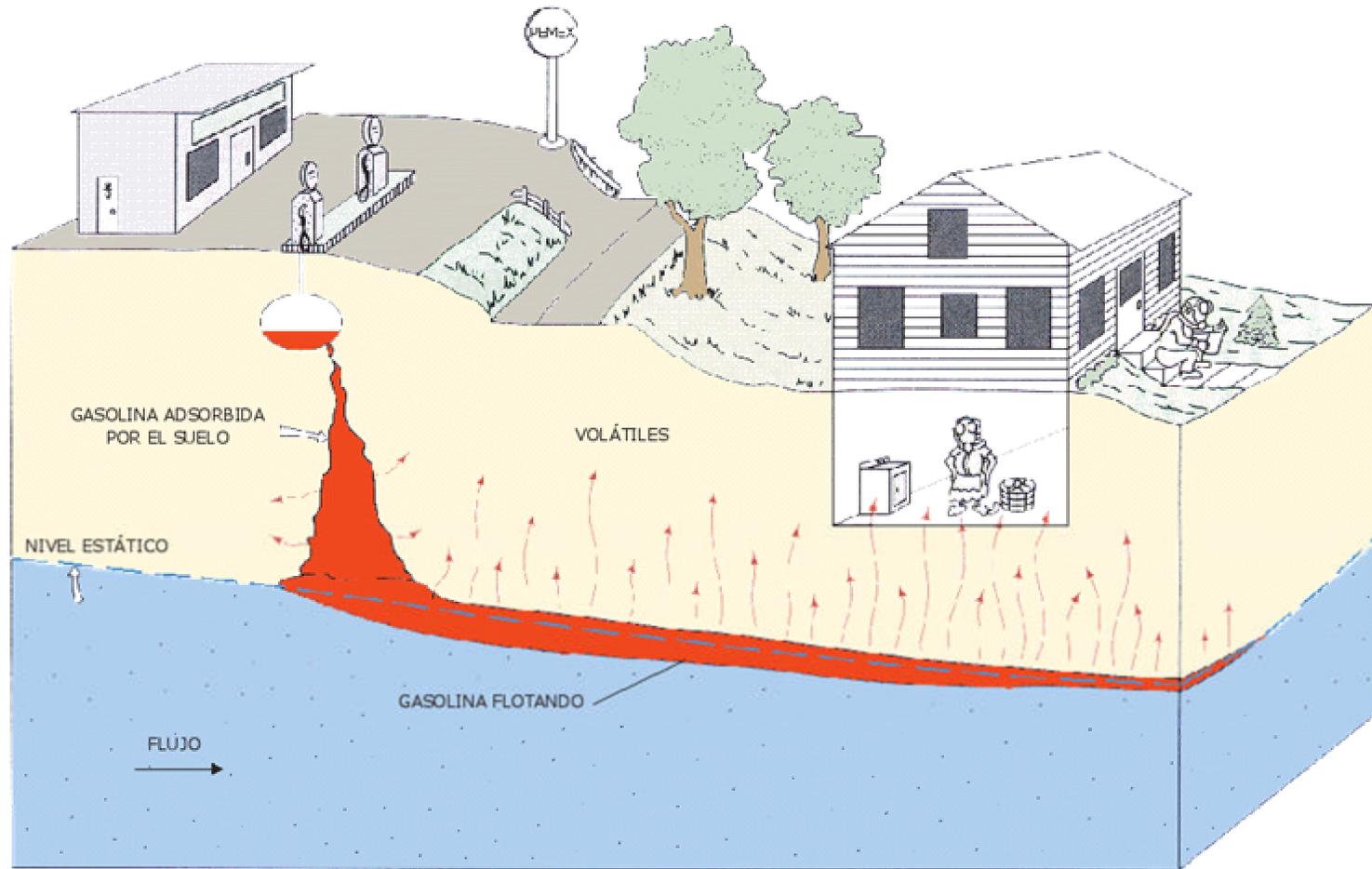
FUGAS DE TANQUES EN GASOLINERAS



MODIFICADO DE: Schwendeman y Wilcox, 1987.



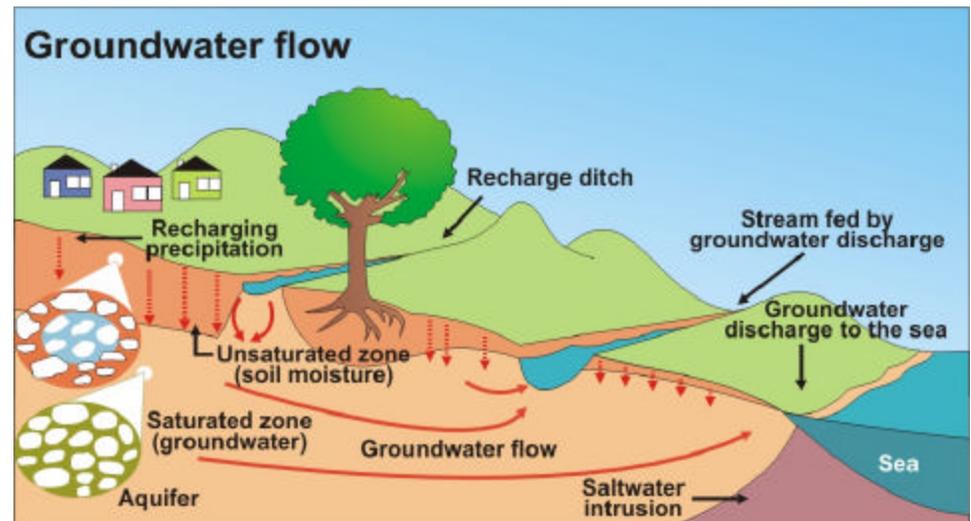
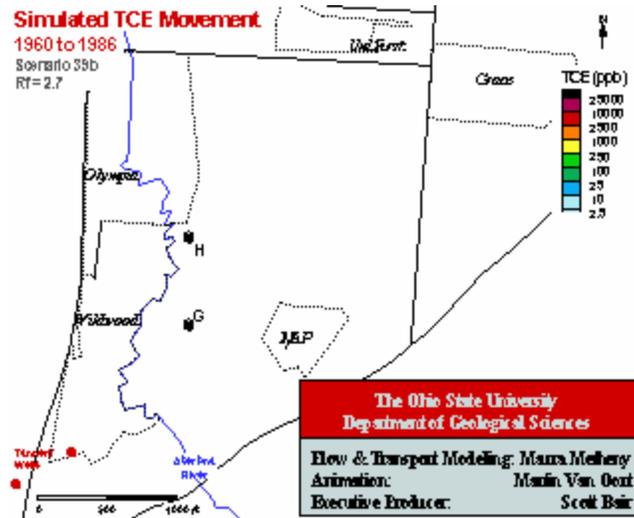
FUGAS, FASE LIBRE Y VOLÁTILES



MODIFICADO DE: Fetter, 1993.



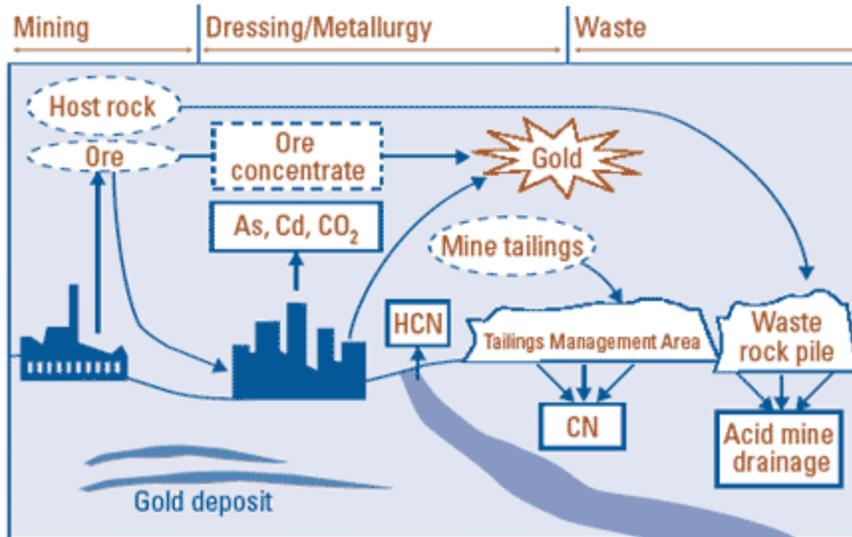
FUENTES COMUNES DE CONTAMINACIÓN



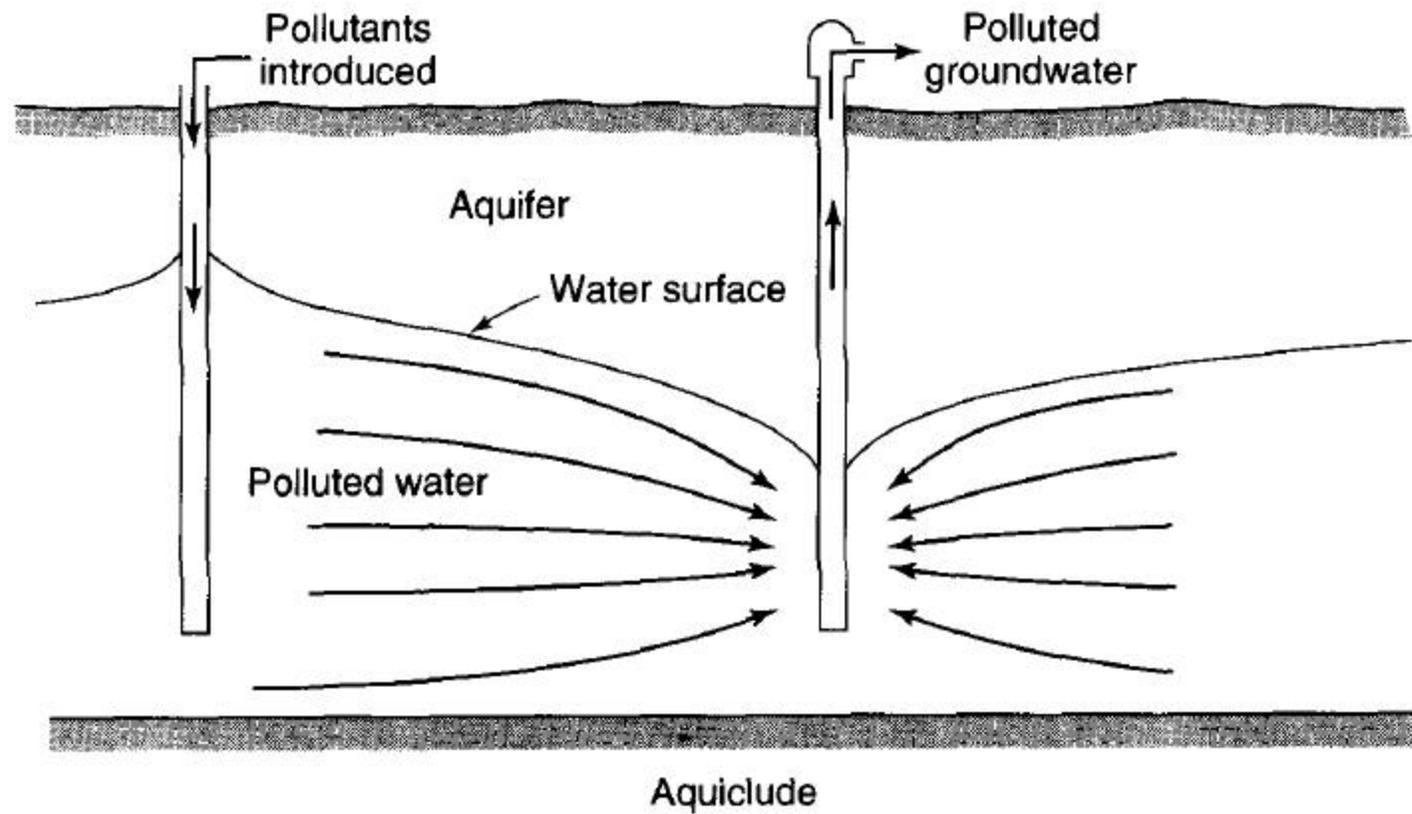
Environment Canada



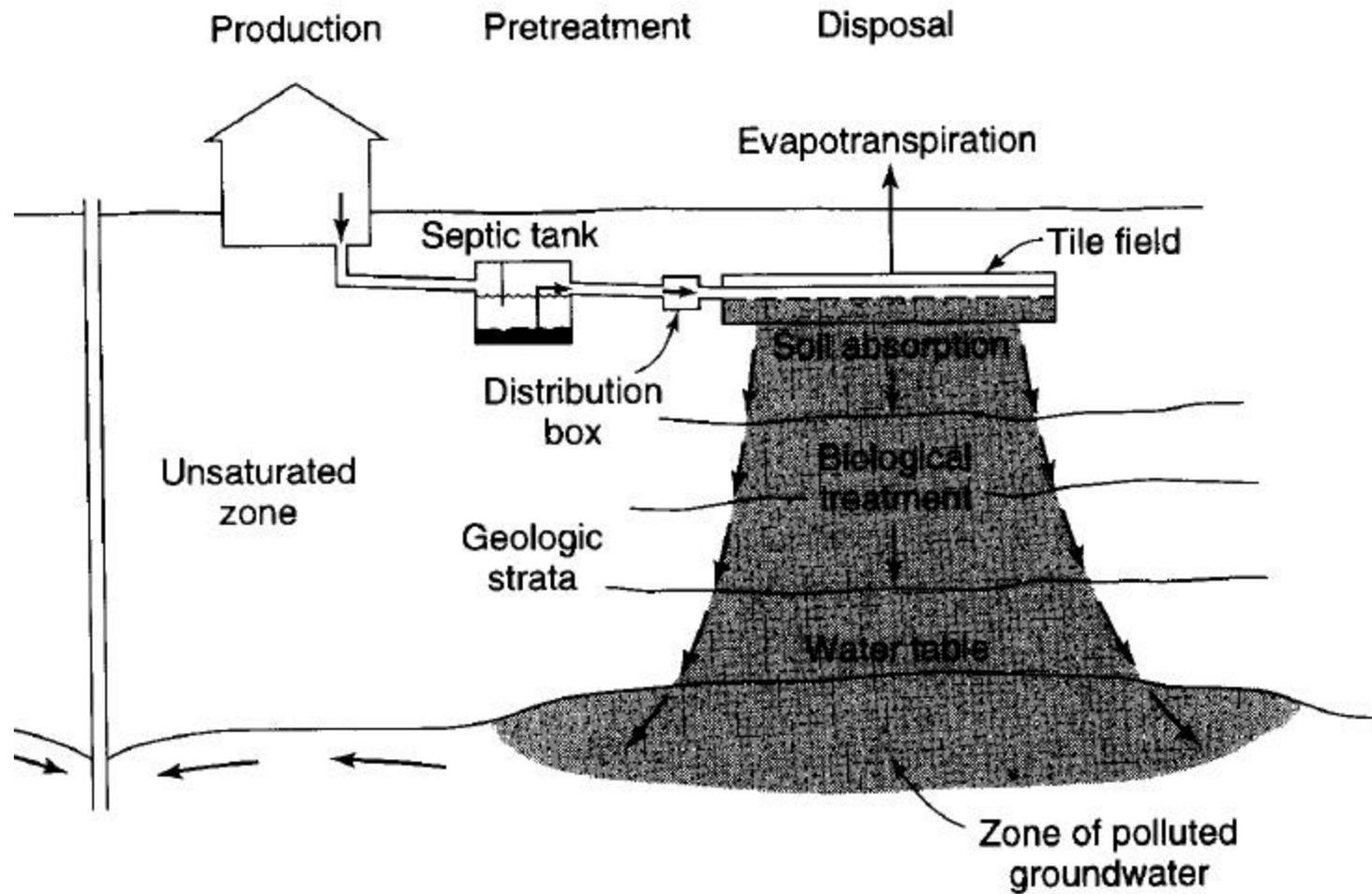
FUENTES COMUNES DE CONTAMINACIÓN



FUENTES COMUNES DE CONTAMINACIÓN



FUENTES COMUNES DE CONTAMINACIÓN



CI66J

INTRODUCCION

FUENTES DE CONTAMINACION

GENERALIDADES

CARACTERISTICAS

CATEGORIAS

PROCESOS DE TRANSPORTE DE MASAS

DERIVACION ECUACION DE TRANSPORTE

EC. ADVECCION-DISPERSION

SOLUCIONES ANALITICAS 1D

SOLUCIONES ANALITICAS 2D

EC. ADVECCION-DISPERSION-REACCION

REACCION DE PRIMER ORDEN

DETERMINACION DE DISPERSIVIDAD



CI66J

El estudio de la contaminación de recursos hídricos subterráneos es de suma importancia tanto en lo que se refiere a las posibles fuentes de contaminación como a los procesos de transporte de estos contaminantes en sistemas acuíferos.

Aspectos importantes para distinguir fuentes de contaminación:

- (1) localización
- (2) historia
- (3) tipos de contaminantes



LOCALIZACION

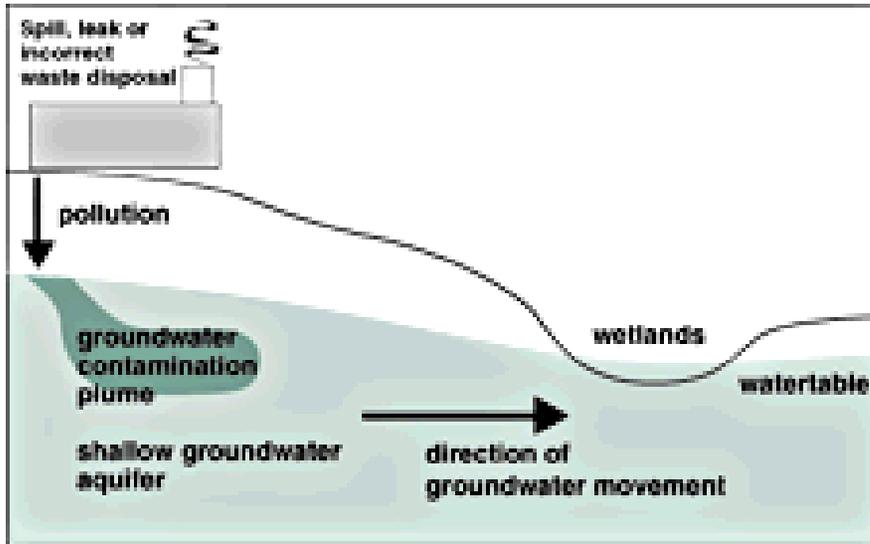
En la práctica, los términos "puntual" o "no puntual" describen la localización de la fuente.

Una fuente puntual es caracterizada por la presencia de una fuente de pequeño tamaño, mientras que una fuente no puntual describe un origen difuso de la contaminación.

Una fuente "puntual" es caracterizada por la presencia de una fuente, pequeña y claramente identificable.

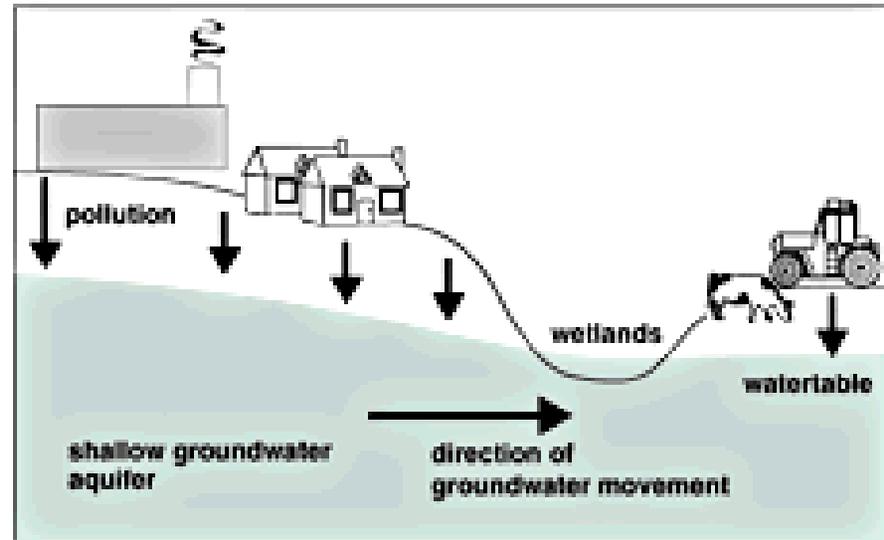
En el caso de fuentes no puntuales o difusas podemos incluir el caso de pesticidas y herbicidas que son aplicados a grandes extensiones de terreno.





PUNTUAL

DIFUSA



HISTORIA

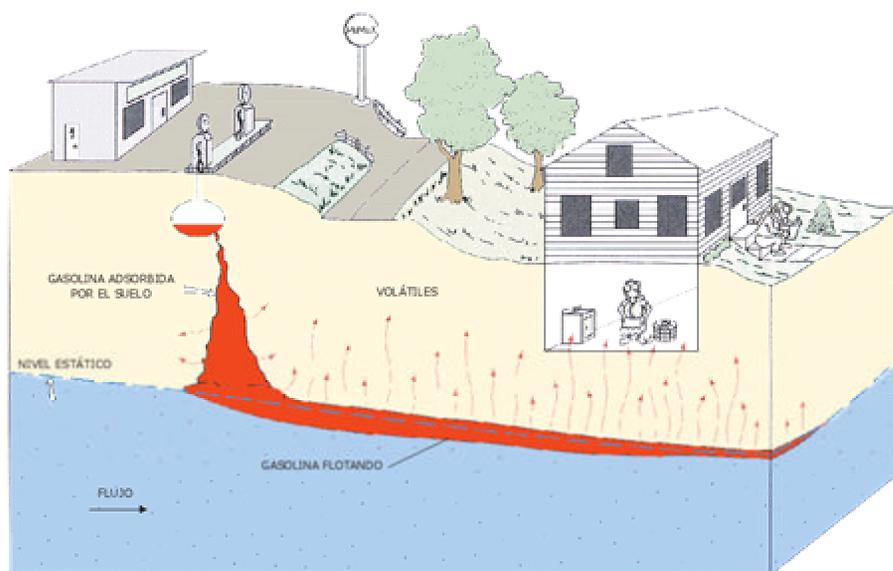
La historia de la fuente se refiere principalmente a como se ha modificado la tasa de producción de contaminante a través del tiempo.

Un derrame es un ejemplo de fuente no continua, en la cual se produce un elevado nivel de contaminación superficial o subterránea por un corto tiempo.

A diferencia del anterior, un estanque de almacenamiento de combustible que esté vertiendo a través de fracturas o roturas es una fuente continua.



CI66J



MODIFICADO DE: FINEK, 1993.

CONTINUO

DERRAME



TIPO DE CONTAMINANTE

Un enfoque que se ha utilizado es concentrarse en un grupo que muy comúnmente se encuentran en efluentes y en fuentes de agua potable, que produce efectos adversos sobre la salud o que persisten a través de la cadena alimenticia.

Un ejemplo de este tipo de listas lo constituye la información publicada por EPA, la que señala un total de 129 compuestos prioritarios, 114 de ellos orgánicos y 15 inorgánicos, principalmente metales.

Los compuestos de origen orgánico se separan comúnmente en cuatro categorías: volátiles, neutrales extractables, ácidos extractables y pesticidas.



TIPO DE CONTAMINANTE

Otra manera de agrupar compuestos es a través del tipo de reacción y modo de ocurrencia. En este sentido es común referirse a los siguientes grupos de compuestos:

- (1) materiales radioactivos,
- (2) metales pesados,
- (3) nutrientes,
- (4) otros inorgánicos,
- (5) contaminantes orgánicos, y
- (6) contaminantes de origen microbiológico.



CI66J

INTRODUCCION

FUENTES DE CONTAMINACION

GENERALIDADES

CARACTERISTICAS

CATEGORIAS

PROCESOS DE TRANSPORTE DE MASAS

DERIVACION ECUACION DE TRANSPORTE

EC. ADVECCION-DISPERSION

SOLUCIONES ANALITICAS 1D

SOLUCIONES ANALITICAS 2D

EC. ADVECCION-DISPERSION-REACCION

REACCION DE PRIMER ORDEN

DETERMINACION DE DISPERSIVIDAD



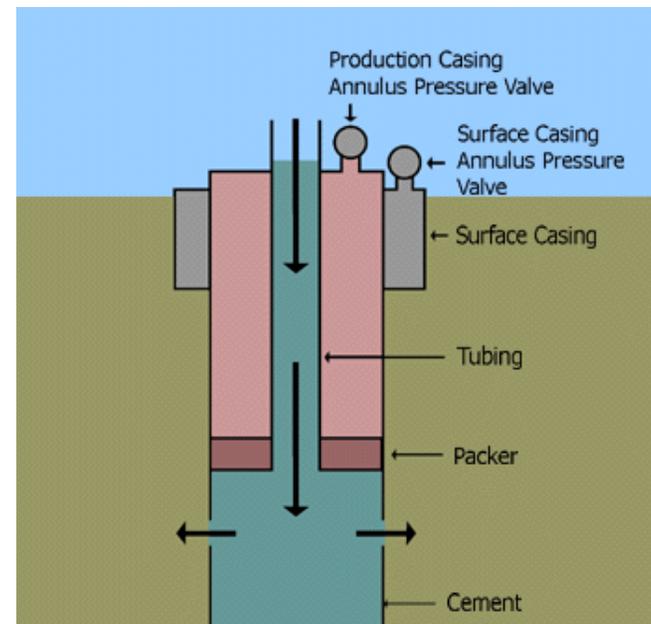
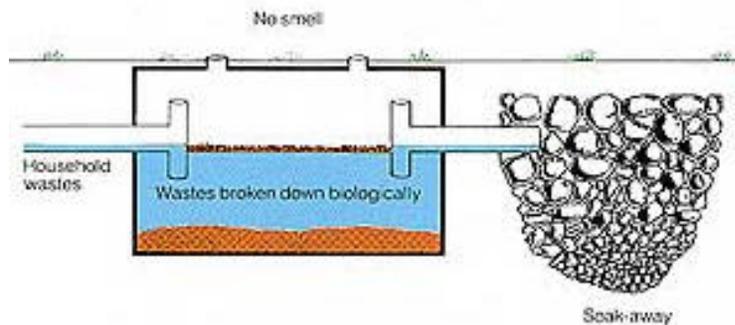
CATEGORIAS DE FUENTES DE CONTAMINACION

Categoría I .

Fuentes Diseñadas a la Descarga de Sustancias

Fosas sépticas, Pozos de inyección, y Aplicación al suelo.

A Septic Tank Working Effectively

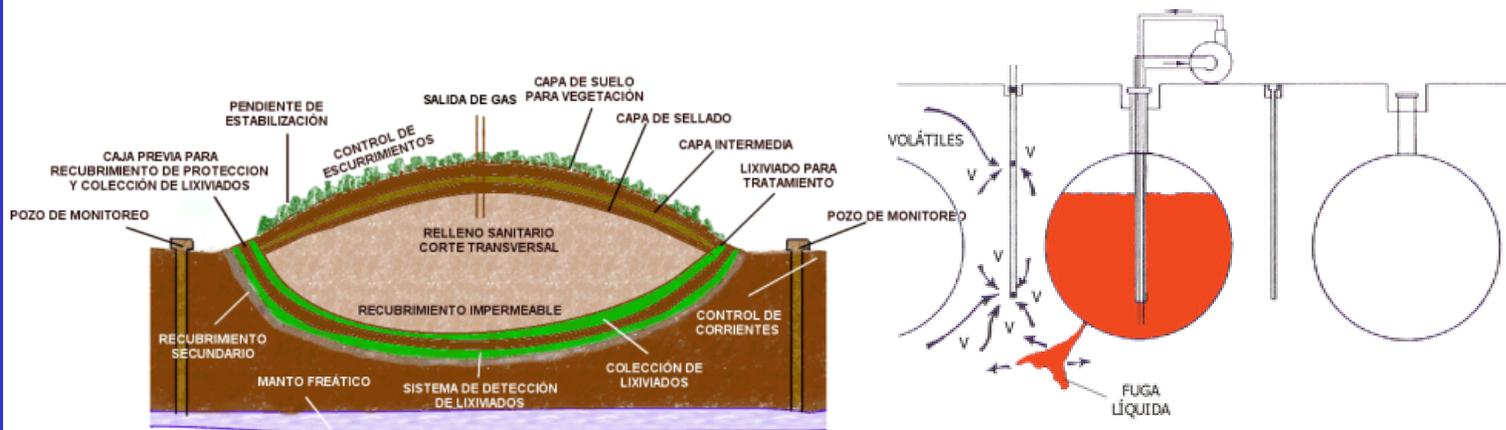


CATEGORIAS DE FUENTES DE CONTAMINACION

Categoría II.

Fuentes Diseñadas para el Almacenamiento, Tratamiento y/o Disposición de Sustancias

Rellenos sanitarios, Basureros, Pozas o lagunas de almacenamiento, Desechos mineros, Cementerios, Estanques de almacenamiento sobre el suelo, Estanques de almacenamiento bajo el suelo, Contenedores.



MODIFICADO DE: Schwendeman y Wilcox, 1987.



CATEGORIAS DE FUENTES DE CONTAMINACION

Categoría III.

Fuentes Diseñadas para Retener sustancias durante Transporte.

Tuberías de alcantarillado, Transporte y Transferencia de Materiales



CATEGORIAS DE FUENTES DE CONTAMINACION

Categoría IV.

Fuentes que Descargan Sustancias como Resultado de Otras Actividades.

Riego, Aplicación de Pesticidas, Aplicación de Fertilizantes, Residuos Animales, Aplicación de Sales, Drenaje Urbano, Drenaje de Minas

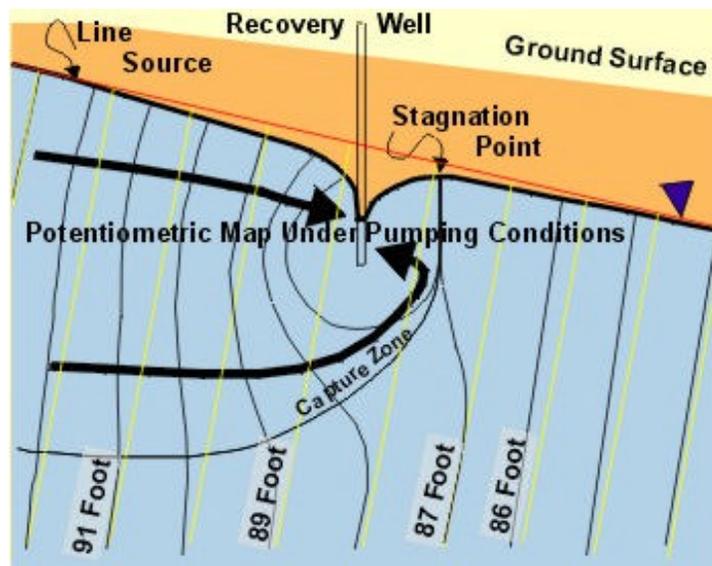


CATEGORIAS DE FUENTES DE CONTAMINACION

Categoría V.

Fuentes que proveen un Mecanismo para que Agua Contaminada entre al Acuífero.

Pozos de Producción, Pozos de Monitoreo y calicatas de exploración, Excavaciones



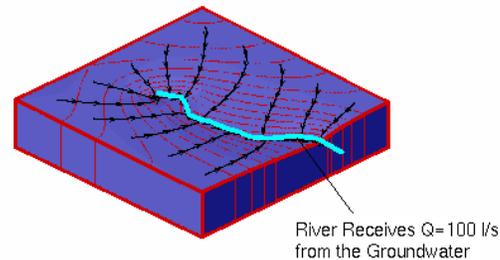
CATEGORIAS DE FUENTES DE CONTAMINACION

Categoría VI .

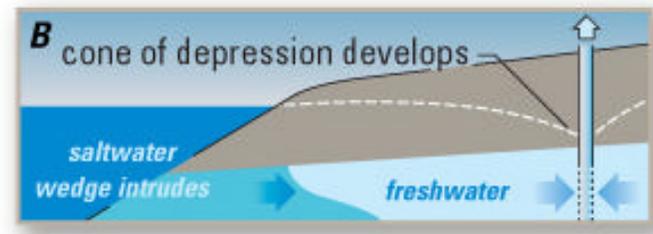
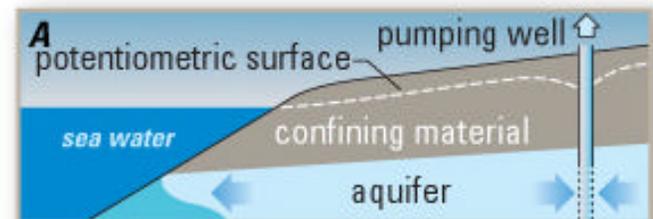
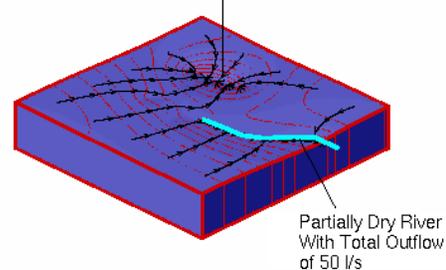
Fuentes de Origen Natural Cuyo Efecto es Aumentado por la Actividad Humana.

Interacción Agua Superficial y Subterránea, e Intrusión Salina

Natural Groundwater Flow



Groundwater Flow with Pumping Well



CI66J

INTRODUCCION

FUENTES DE CONTAMINACION

GENERALIDADES

CARACTERISTICAS

CATEGORIAS

PROCESOS DE TRANSPORTE DE MASAS

DERIVACION ECUACION DE TRANSPORTE

EC. ADVECCION-DISPERSION

SOLUCIONES ANALITICAS 1D

SOLUCIONES ANALITICAS 2D

EC. ADVECCION-DISPERSION-REACCION

REACCION DE PRIMER ORDEN

DETERMINACION DE DISPERSIVIDAD



PROCESOS DE TRANSPORTE

Existen diversos procesos que permiten describir el movimiento de uno o más contaminantes en un medio poroso saturado. Para un compuesto conservativo en un medio homogéneo se tienen los siguientes procesos:

-Advección

-Difusión

-Dispersión Mecánica



-Dispersión Hidrodinámica

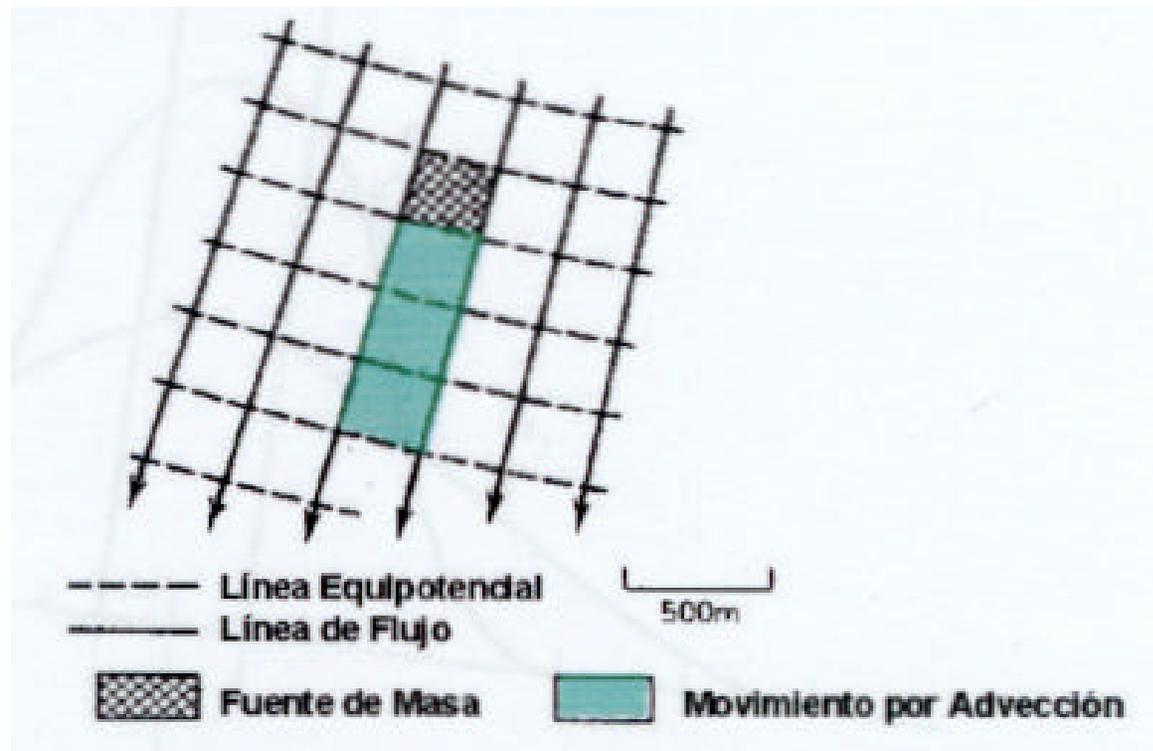
Si consideramos un medio heterogéneo se agrega el siguiente proceso:

-Macrodispersión



TRANSPORTE POR ADVECCION

Sólidos disueltos son llevados junto con el flujo de agua subterránea. Este proceso se denomina **transporte advectivo** o **convectivo**.



TRANSPORTE POR ADVECCION

La cantidad de soluto que está siendo transportado es una función de su concentración en el agua subterránea y de la cantidad de agua subterránea que fluye.

$$v_x = \frac{K}{n} \cdot \frac{dh}{dl}$$

La **velocidad promedio lineal**, v_x , es la velocidad a la cual el agua subterránea se mueve a través de tubos de flujo individuales.

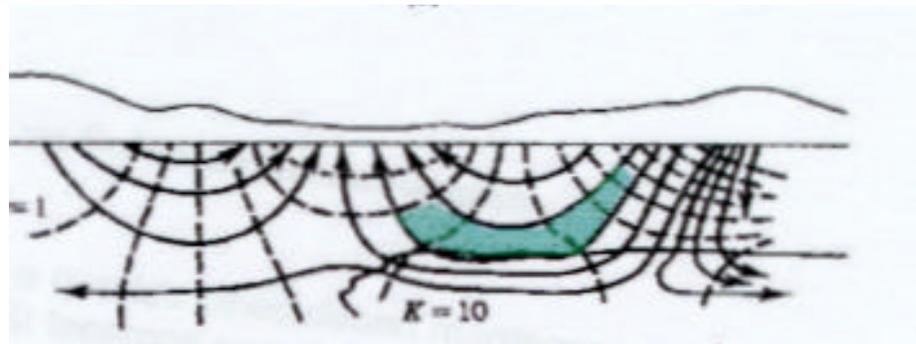
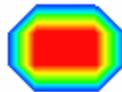
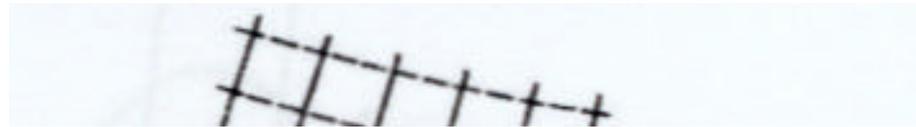
El flujo másico por unidad de área y tiempo (J) queda dado por:

$$J_x = v_x \cdot n \cdot C$$



CI66J

TRANSPORTE POR ADVECCION



TRANSPORTE POR DIFUSION

Un soluto en el agua se mueve desde áreas de mayor concentración hacia un área de menor concentración.

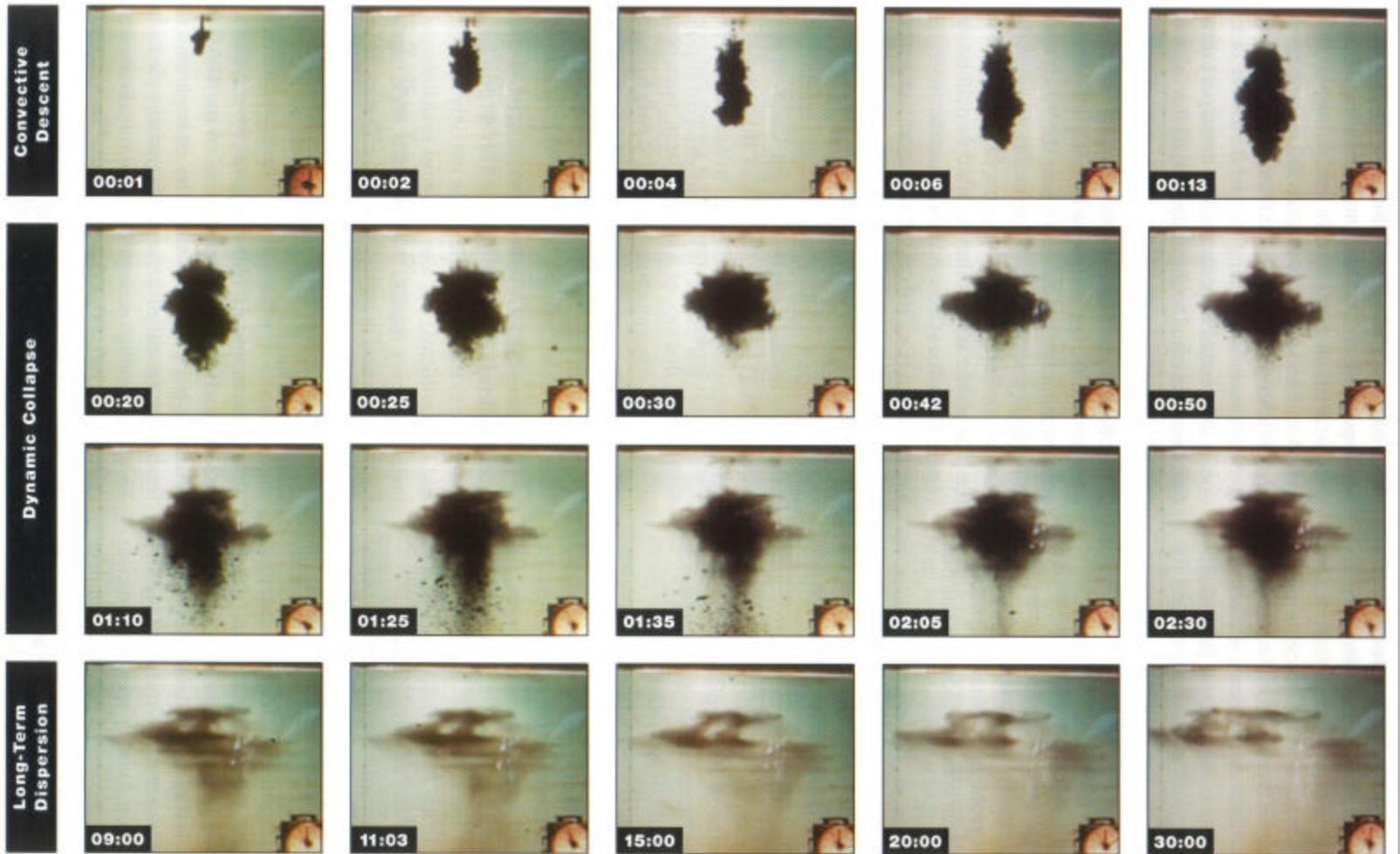
Este proceso se conoce como **difusión molecular**, o simplemente como **difusión**. La masa de fluido que se difunde es proporcional al gradiente de concentración, lo cual se expresa mediante la **primera ley de Fick**.

$$J_x = -D_d \cdot \frac{dC}{dx}$$

Valores de D_d son bien conocidos y se encuentran en el rango 1×10^{-9} a 2×10^{-9} m²/s a 25°C. Estos valores no varían mucho con la concentración, pero dependen de la temperatura.



TRANSPORTE POR DIFUSION

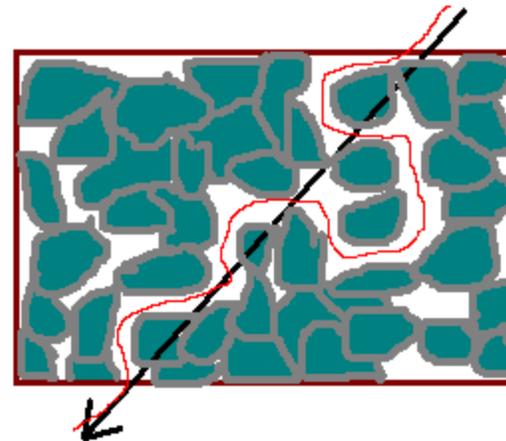


TRANSPORTE POR DIFUSION

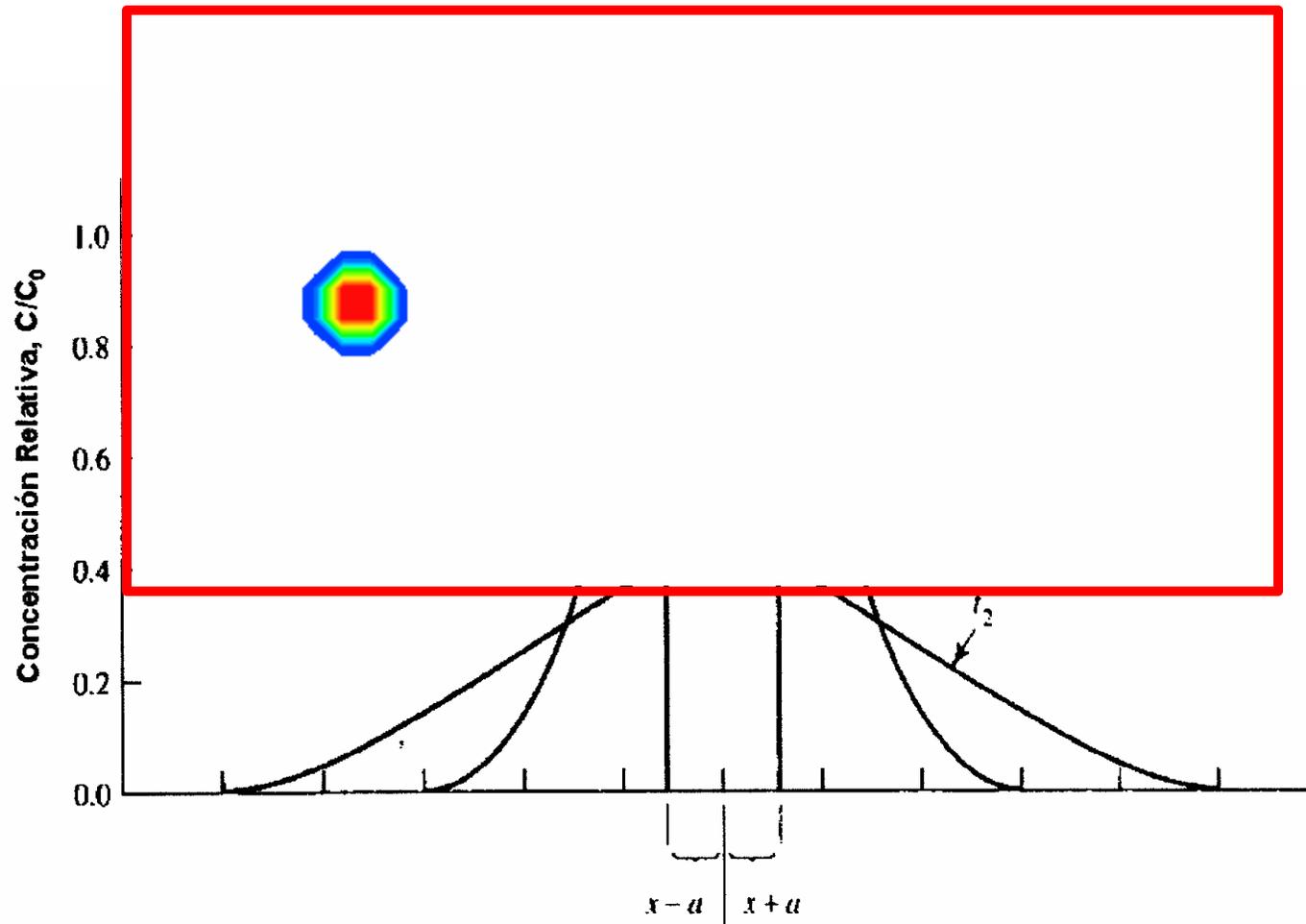
En un medio poroso la difusión no ocurre tan rápido como en el agua debido a que los iones deben seguir caminos más largos a través de los granos de suelo. Para tomar en cuenta este hecho, se debe usar un coeficiente de difusión efectivo, D^* :

$$D^* = w \cdot D_d$$

$$J_x = -D^* \cdot \frac{dC}{dx}$$

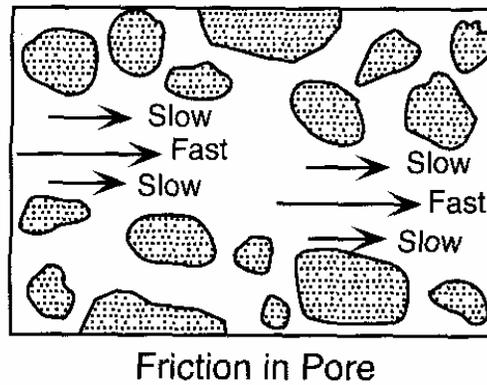
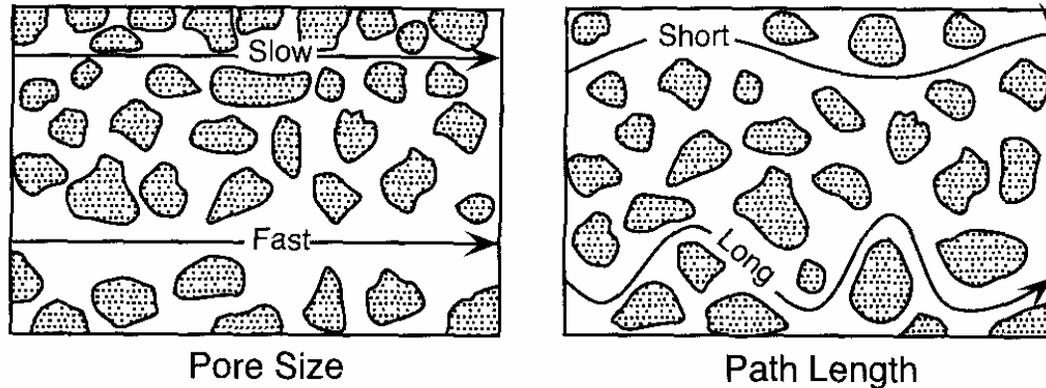


TRANSPORTE POR DIFUSION



TRANSPORTE POR DISPERSION MECANICA

El agua subterránea se mueve a tasas que son mayores y también menores que la velocidad promedio lineal.



TRANSPORTE POR DISPERSION MECANICA

Si toda el agua subterránea que contiene un soluto viajara a una velocidad exactamente igual se produciría el desplazamiento del agua que no contiene el soluto lo que daría origen a una interface abrupta entre los dos líquidos.

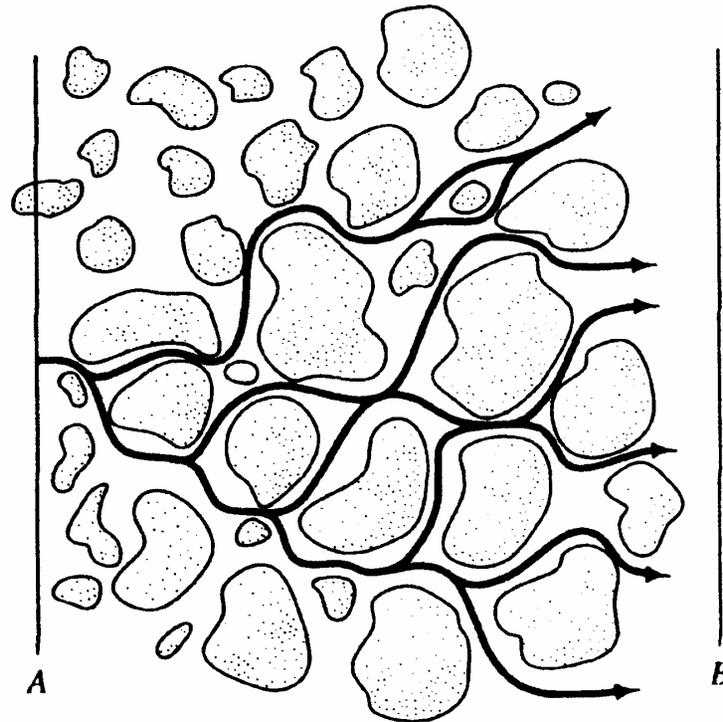
Sin embargo, debido a que el agua no viaja a una velocidad constante se produce un cierto grado de mezcla a través del tubo de flujo. Este proceso de mezcla se conoce como **dispersión mecánica**, y produce dilución del soluto a lo largo del frente de avance.

La mezcla que ocurre a lo largo de la dirección del flujo se denomina **dispersión longitudinal**.

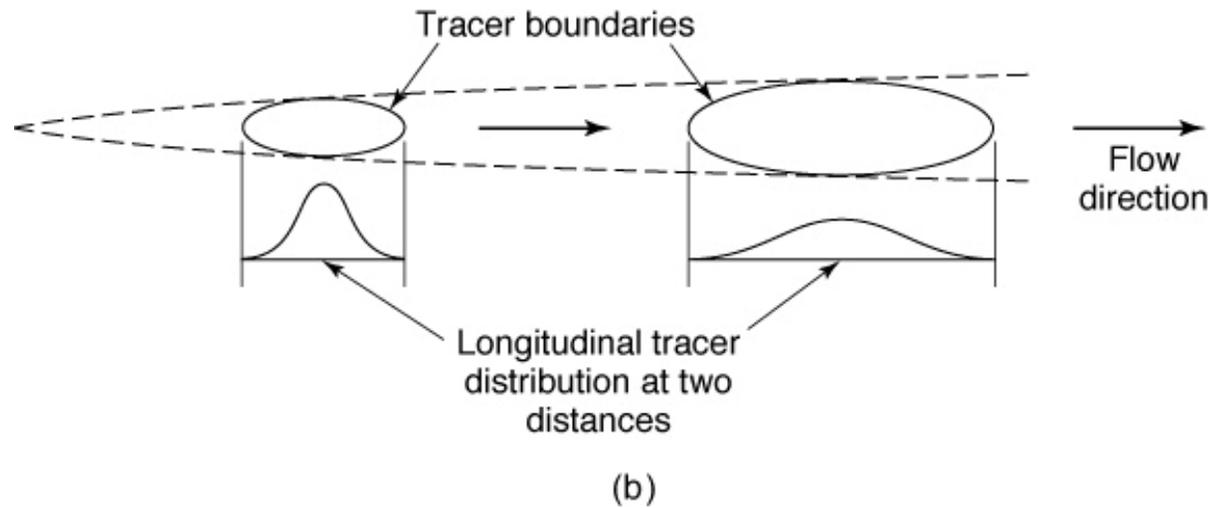
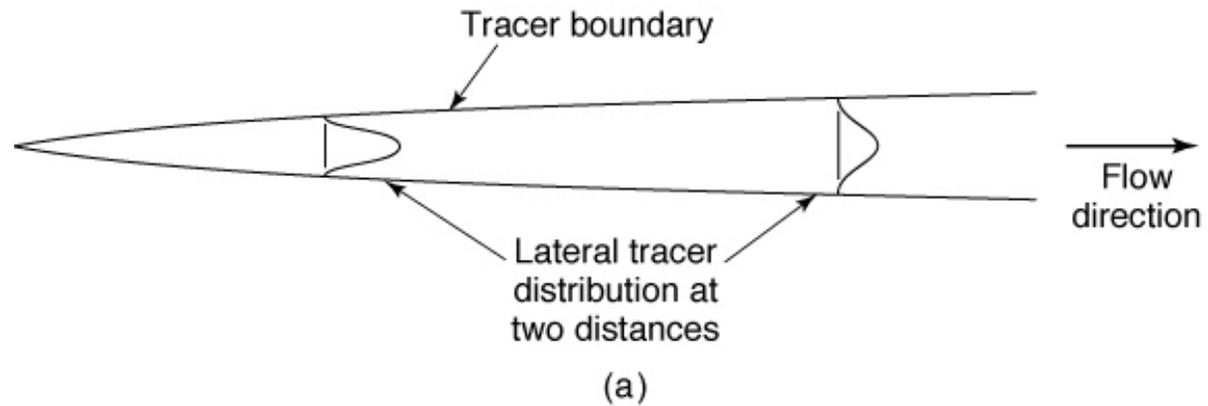


TRANSPORTE POR DISPERSION MECANICA

Un frente de soluto que avanza tiende a dispersarse no sólo en la dirección longitudinal, sino también en direcciones perpendiculares del flujo. El resultado de esta mezcla se denomina **dispersión transversal**.



TRANSPORTE POR DISPERSION MECANICA



TRANSPORTE POR DISPERSION MECANICA

La dispersión mecánica puede ser descrita por una ley similar a la Ley de Fick de difusión:

$$J_x = -D_m \cdot \frac{dC}{dx}$$

La tasa de dispersión mecánica es una función de la velocidad promedio lineal, entonces podemos introducir el coeficiente de dispersión mecánica como:

$$D_{mL} = \mathbf{a}_L \cdot v_i$$

$$D_{mT} = \mathbf{a}_T \cdot v_i$$

donde v_i es la velocidad promedio lineal en la dirección i (L/T), mientras que \mathbf{a}_L y \mathbf{a}_T son la dispersividad en las dirección longitudinal (L) y transversal (T).



TRANSPORTE POR DISPERSION HIDRODINAMICA

Los procesos de difusión molecular y dispersión mecánica no pueden ser separados en un flujo de agua subterránea. Los dos mecanismos se combinan para definir un parámetro llamado el **coeficiente de dispersión hidrodinámica**, D . Este puede ser representado por las siguientes expresiones:

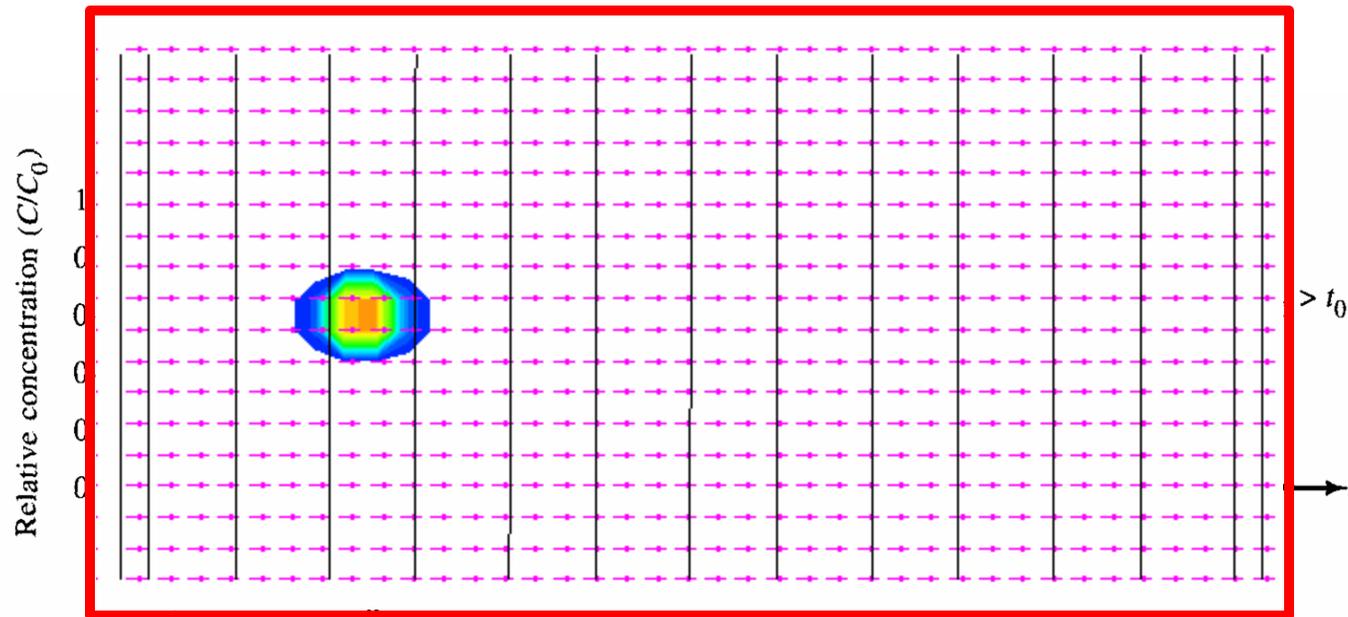
$$D_L = a_L \cdot v_i + D^*$$

$$D_T = a_T \cdot v_i + D^*$$

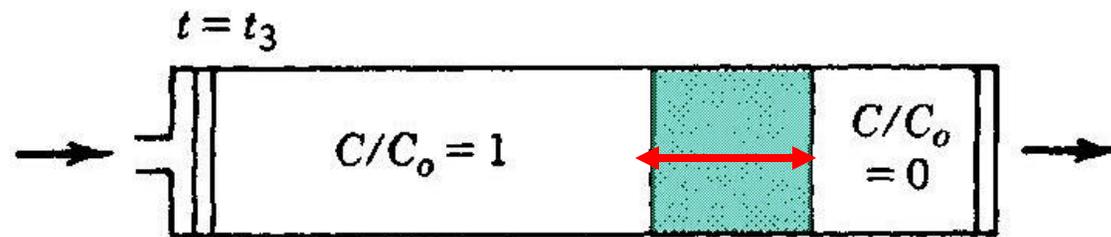
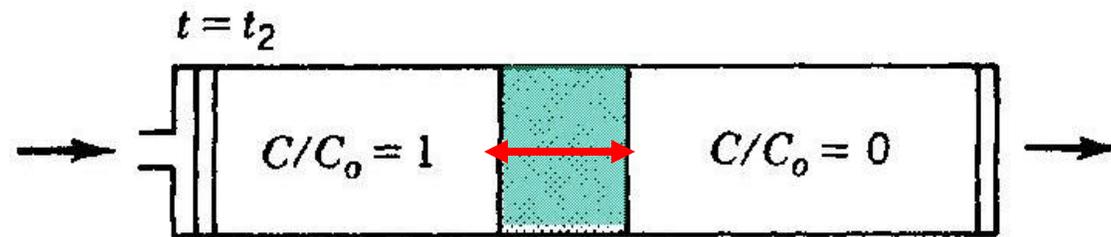
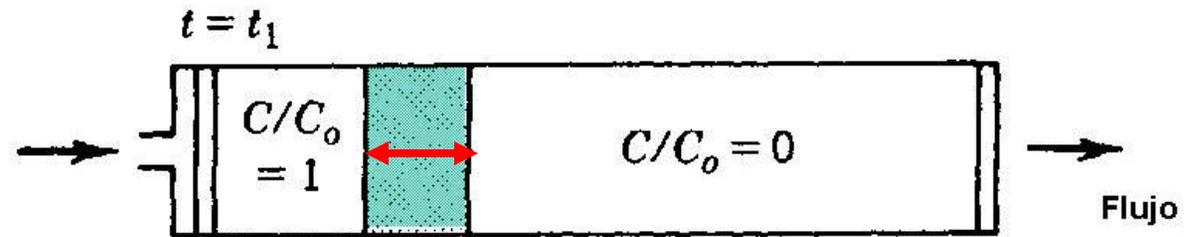
donde D_L es el coeficiente de dispersión hidrodinámica paralelo a la dirección principal de flujo o longitudinal, D_T es el coeficiente de dispersión hidrodinámica perpendicular a la dirección principal de flujo o transversal, a_L es la dispersividad longitudinal, y a_T es la dispersividad transversal.

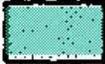


TRANSPORTE POR ADVECCION/DISPERSION



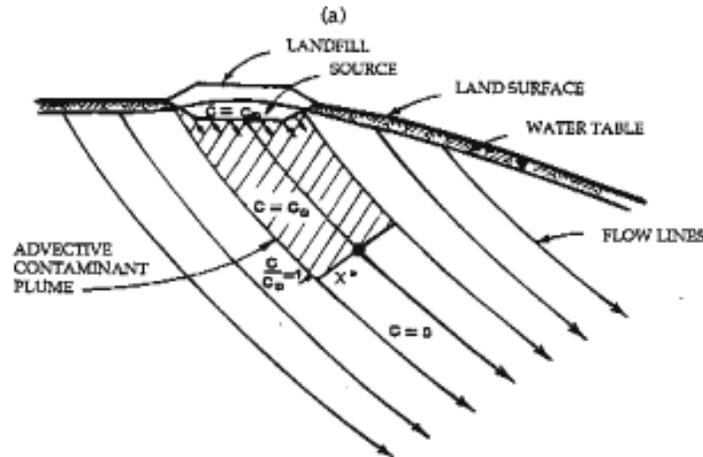
TRANSPORTE POR ADVECCION/DISPERSION



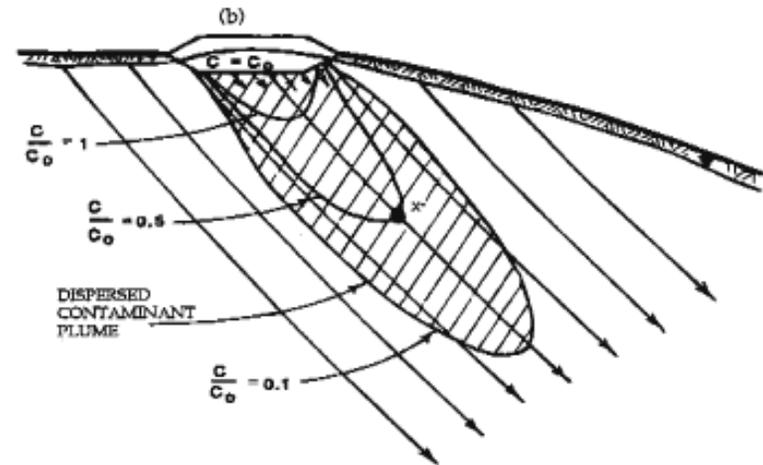
Zona de Dispersión 



TRANSPORTE POR ADVECCION/DI SPERSION



Figures 5.1 a to e Effects of advection and dispersion on contaminant plume.



CI66J

INTRODUCCION

FUENTES DE CONTAMINACION

GENERALIDADES

CARACTERISTICAS

CATEGORIAS

PROCESOS DE TRANSPORTE DE MASAS

DERIVACION ECUACION DE TRANSPORTE

EC. ADVECCION-DISPERSION

SOLUCIONES ANALITICAS 1D

SOLUCIONES ANALITICAS 2D

EC. ADVECCION-DISPERSION-REACCION

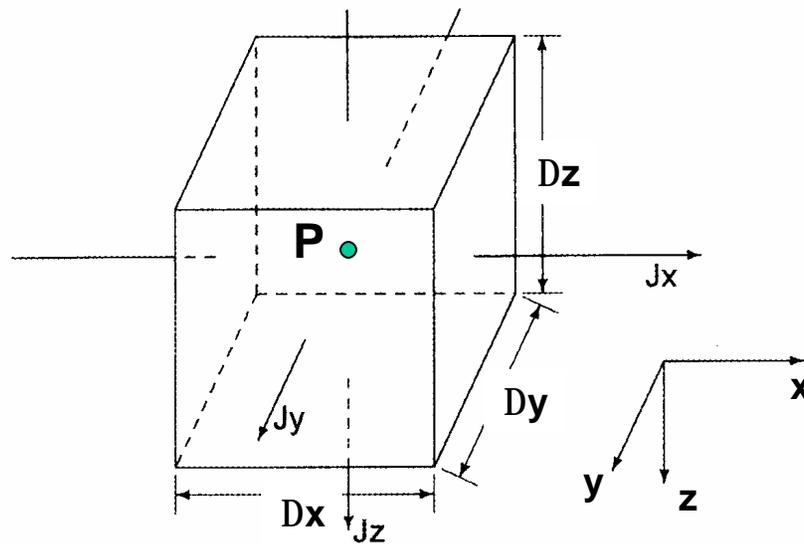
REACCION DE PRIMER ORDEN

DETERMINACION DE DISPERSIVIDAD



CI66J

Consideremos un volumen de control rectangular con dimensiones Dx , Dy y Dz , mientras que su centro de masa P se encuentra ubicado en las coordenadas (x,y,z) .



$$J_i = v_i \cdot n \cdot C - n \cdot D_i \cdot \frac{\partial C}{\partial i}$$



La derivación de la ecuación de Advección-Dispersión está basada en el trabajo de Freeze and Cherry (1979), Bear (1972) y Ogata (1970). Los supuestos o hipótesis básicas utilizadas en esta derivación son que el acuífero es homogéneo, isotrópico, y saturado. Asimismo, las condiciones de flujo son tales que la ley de Darcy es válida.

El soluto es transportado por advección y dispersión hidrodinámica. En la dirección i el transporte de soluto debido al proceso de advección, $J_{ADV,i}$ y al de dispersión hidrodinámica, $J_{DISP,i}$ queda dado por:

$$J_{ADV} = v_i \cdot n \cdot C \, dA$$

$$J_{DISP} = -n \cdot D_i \cdot \frac{\partial C}{\partial i} \, dA$$

donde dA es el área transversal del elemento infinitesimal y la dirección i es perpendicular a dicha sección.



CI66J

La masa total de soluto, por unidad de área, que es transportada en la dirección i por unidad de tiempo, J_i , es la suma del flujo advectivo y dispersivo:

$$J_i = v_i \cdot n \cdot C - n \cdot D_i \cdot \frac{\partial C}{\partial i}$$

La diferencia entre la masa que entra y sale del volumen de control, ΔJ , queda dada por la siguiente expresión:

$$\Delta J = - \left(\frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} \right) dx dy dz$$

La tasa a la cual la masa de soluto cambia dentro del volumen de control se puede escribir como:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = n \cdot \frac{\partial C}{\partial t} dx dy dz$$



La ley de conservación de la masa indica que la tasa a la cual la masa de soluto cambia en el tiempo debe ser igual a la diferencia de masa que entra y sale del volumen de control:

$$-\nabla \cdot \mathbf{J} = n \cdot \frac{\partial C}{\partial t}$$

Al substituir la expresión del flujo de contaminante se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - v_x \cdot C \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} - v_y \cdot C \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \cdot \frac{\partial C}{\partial z} - v_z \cdot C \right) = \frac{\partial C}{\partial t}$$

Si consideramos un sistema de flujo unidimensional, con propiedades homogéneas, podemos escribir:

$$D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t}$$



Resolución de un problema de transporte de contaminantes requiere de:

Una ecuación de estado.

$$D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

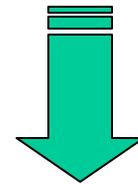
Condiciones de Borde.

$$C(0, t) = C_0 \quad t > 0$$

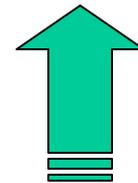
$$C(\infty, t) = 0 \quad t > 0$$

Condiciones Iniciales.

$$C(x, 0) = 0 \quad x > 0$$



$C(x, t)$



CI66J

INTRODUCCION

FUENTES DE CONTAMINACION

GENERALIDADES

CARACTERISTICAS

CATEGORIAS

PROCESOS DE TRANSPORTE DE MASAS

DERIVACION ECUACION DE TRANSPORTE

EC. ADVECCION-DISPERSION

SOLUCIONES ANALITICAS 1D

SOLUCIONES ANALITICAS 2D

EC. ADVECCION-DISPERSION-REACCION

REACCION DE PRIMER ORDEN

DETERMINACION DE DISPERSIVIDAD



Columna Unidimensional, Inyección Continua de Contaminante (Condición de Borde de Primer Tipo)

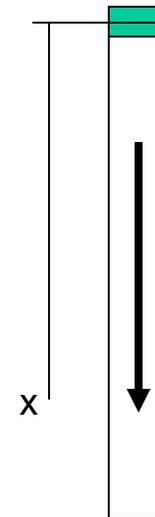
Una solución que contiene un trazador (de color o salino) es incorporada en forma instantánea a una columna de arena en lugar de agua pura, y se mantiene a través del tiempo. El siguiente conjunto de ecuaciones representa la inyección continua de contaminante:

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

$$C(x, 0) = 0 \quad x > 0$$

$$C(0, t) = C_0 \quad t > 0$$

$$C(\infty, t) = 0 \quad t > 0$$



Columna Unidimensional, Inyección Continua de Contaminante (Condición de Borde de Primer Tipo)

La solución al problema anterior queda representada por:

$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} \cdot \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - v_x \cdot t}{2 \cdot \sqrt{D_x \cdot t}} \right) + \exp \left(\frac{v_x \cdot x}{D_x} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x + v_x \cdot t}{2 \cdot \sqrt{D_x \cdot t}} \right) \right]$$

donde:

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x e^{-u^2} du$$

Para muchos problemas prácticos la solución anterior queda:

$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x - v_x \cdot t}{2 \cdot \sqrt{D_x \cdot t}} \right)$$

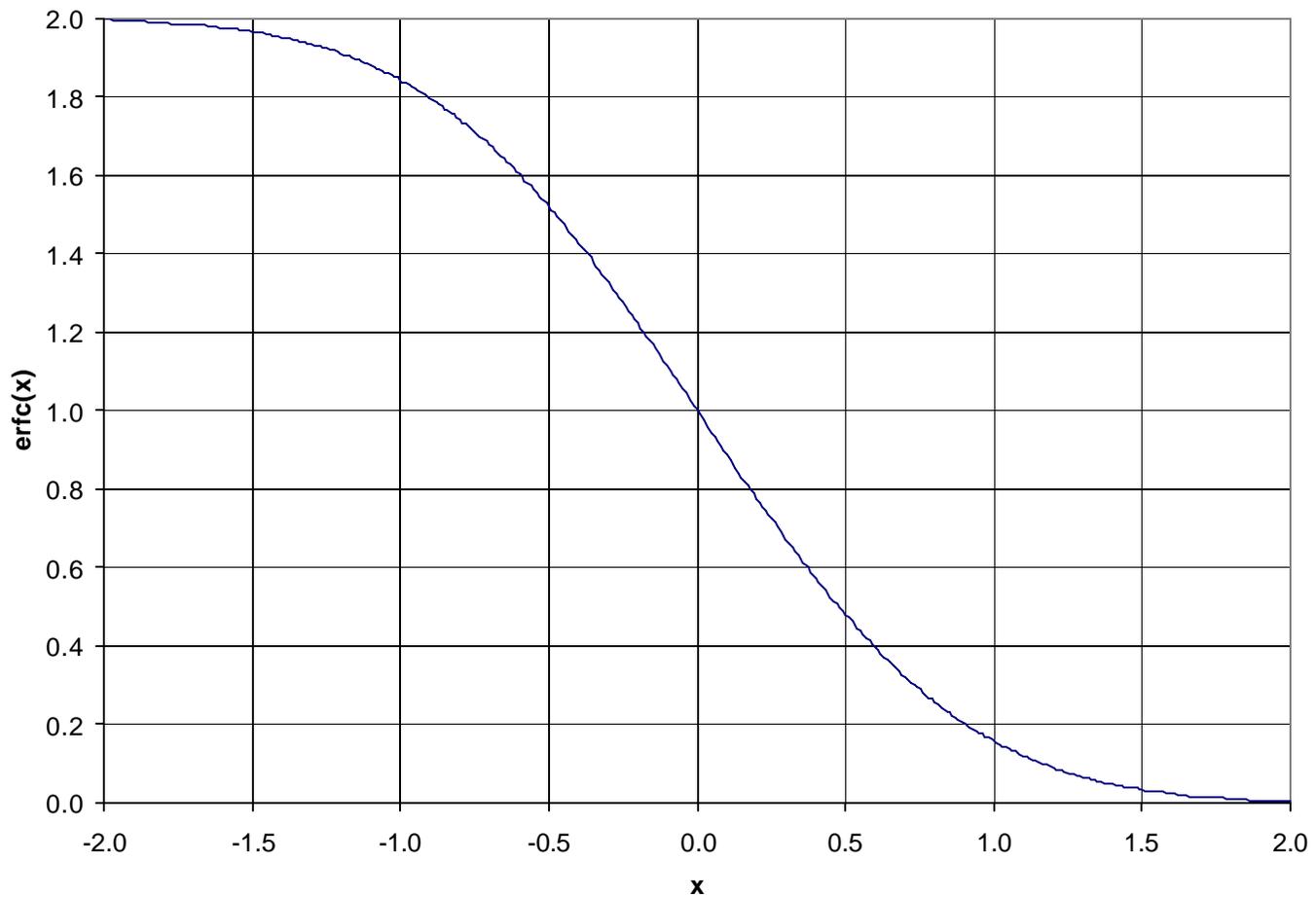
Ogata y Banks (1961)

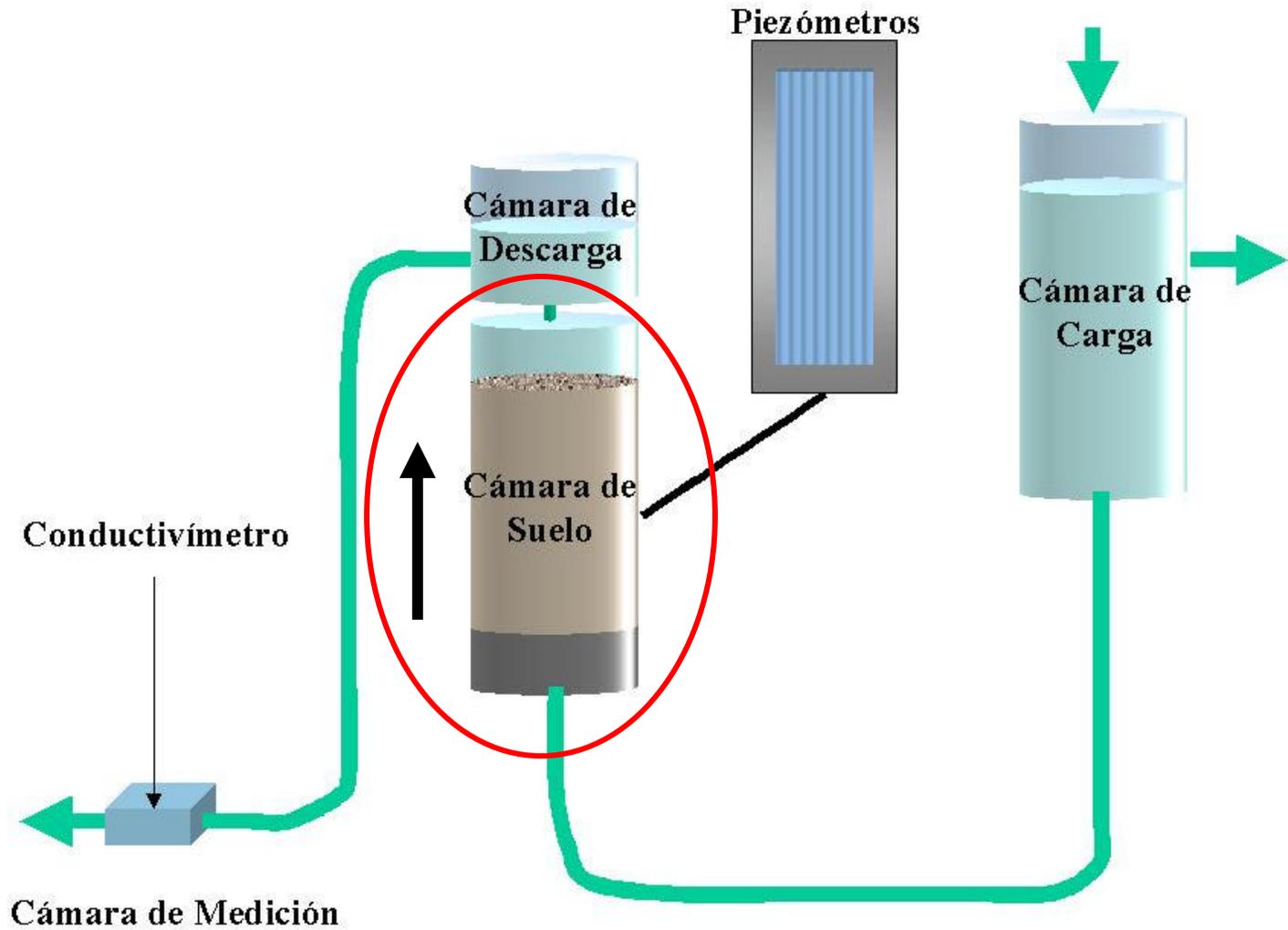


Función de Error: ferc(x) o erfc(x)

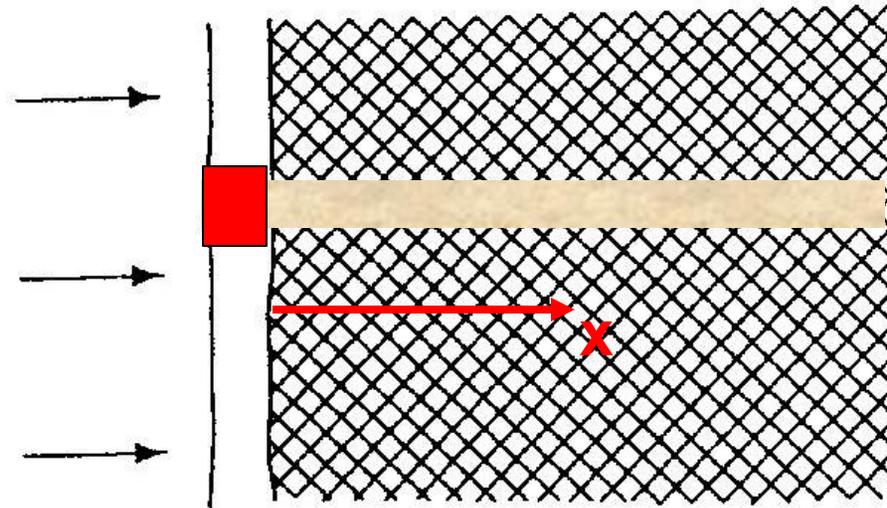
$$erfc(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x e^{-t^2} dt$$

Función de Error Complementario (erfc(x))

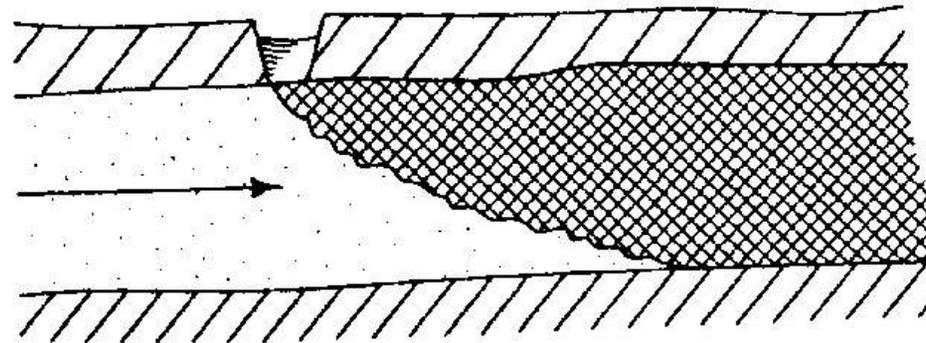




CONTAMINACION DE ACUIFERO

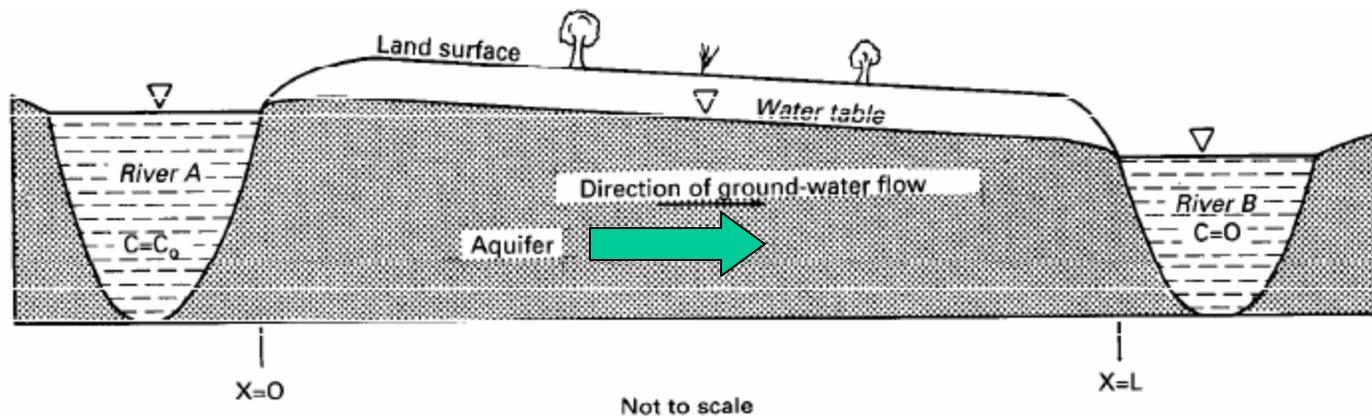
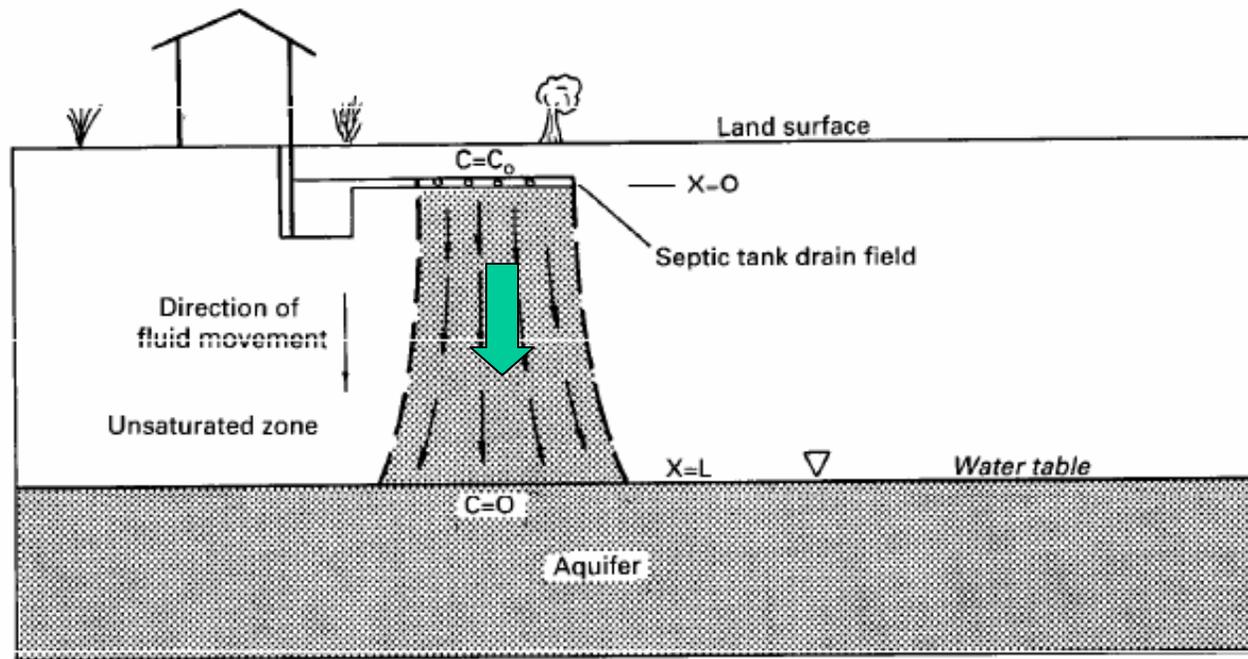


Vista en Planta



Sección Vertical





Columna Unidimensional, Inyección Instantánea de Contaminante (Pulso de Contaminante)

Si se realiza una inyección instantánea de contaminante se producirá un avance gradual de éste, el cual será afectado por un proceso de dispersión hidrodinámica. La ecuación diferencial que describe este problema, junto a las condiciones de borde e iniciales, es la siguiente:

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

$$C(x,0) = C_0 \cdot d(x)$$

$$C(-\infty, t) = 0 \quad t > 0$$

$$C(\infty, t) = 0 \quad t > 0$$

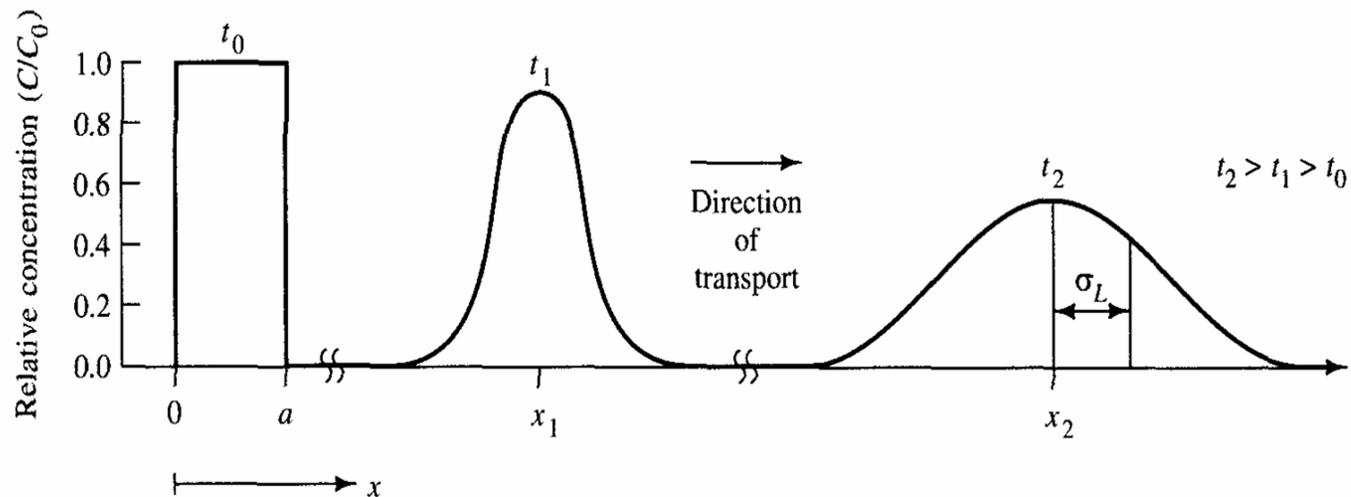


Columna Unidimensional, Inyección Instantánea de Contaminante (Pulso de Contaminante)

La solución al problema anterior queda representada por:

$$C(x,t) = \frac{M}{\sqrt{2 \cdot p \cdot D_x \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - v_x \cdot t)^2}{4 \cdot D_x \cdot t}\right)$$

donde M es la masa inyectada por unidad de área



CI66J

INTRODUCCION

FUENTES DE CONTAMINACION

GENERALIDADES

CARACTERISTICAS

CATEGORIAS

PROCESOS DE TRANSPORTE DE MASAS

DERIVACION ECUACION DE TRANSPORTE

EC. ADVECCION-DISPERSION

SOLUCIONES ANALITICAS 1D

SOLUCIONES ANALITICAS 2D

EC. ADVECCION-DISPERSION-REACCION

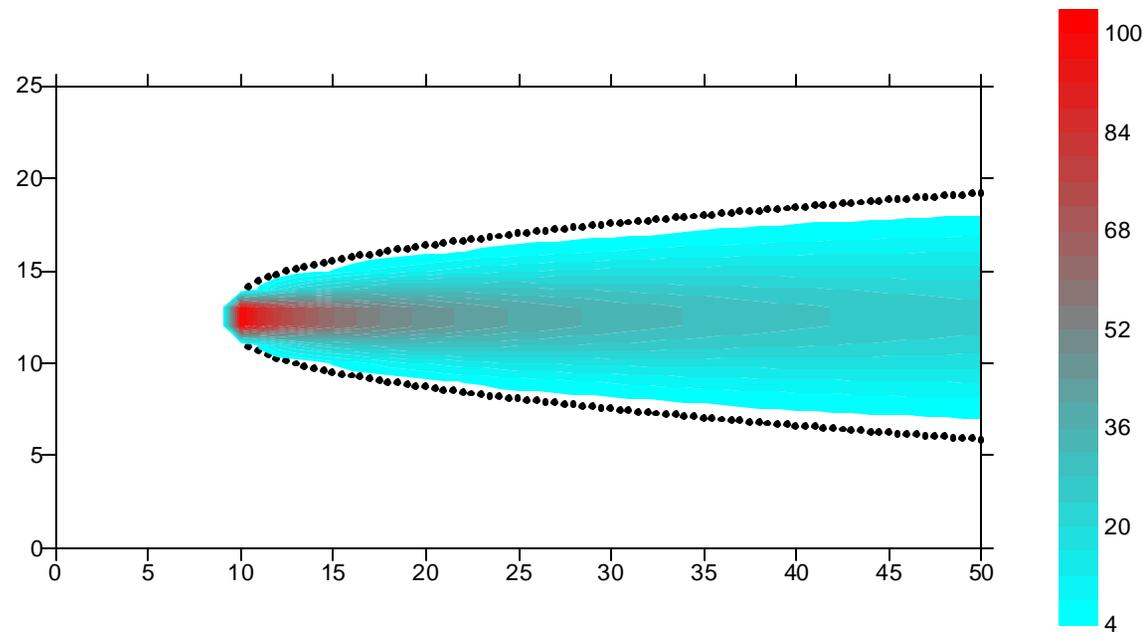
REACCION DE PRIMER ORDEN

DETERMINACION DE DISPERSIVIDAD



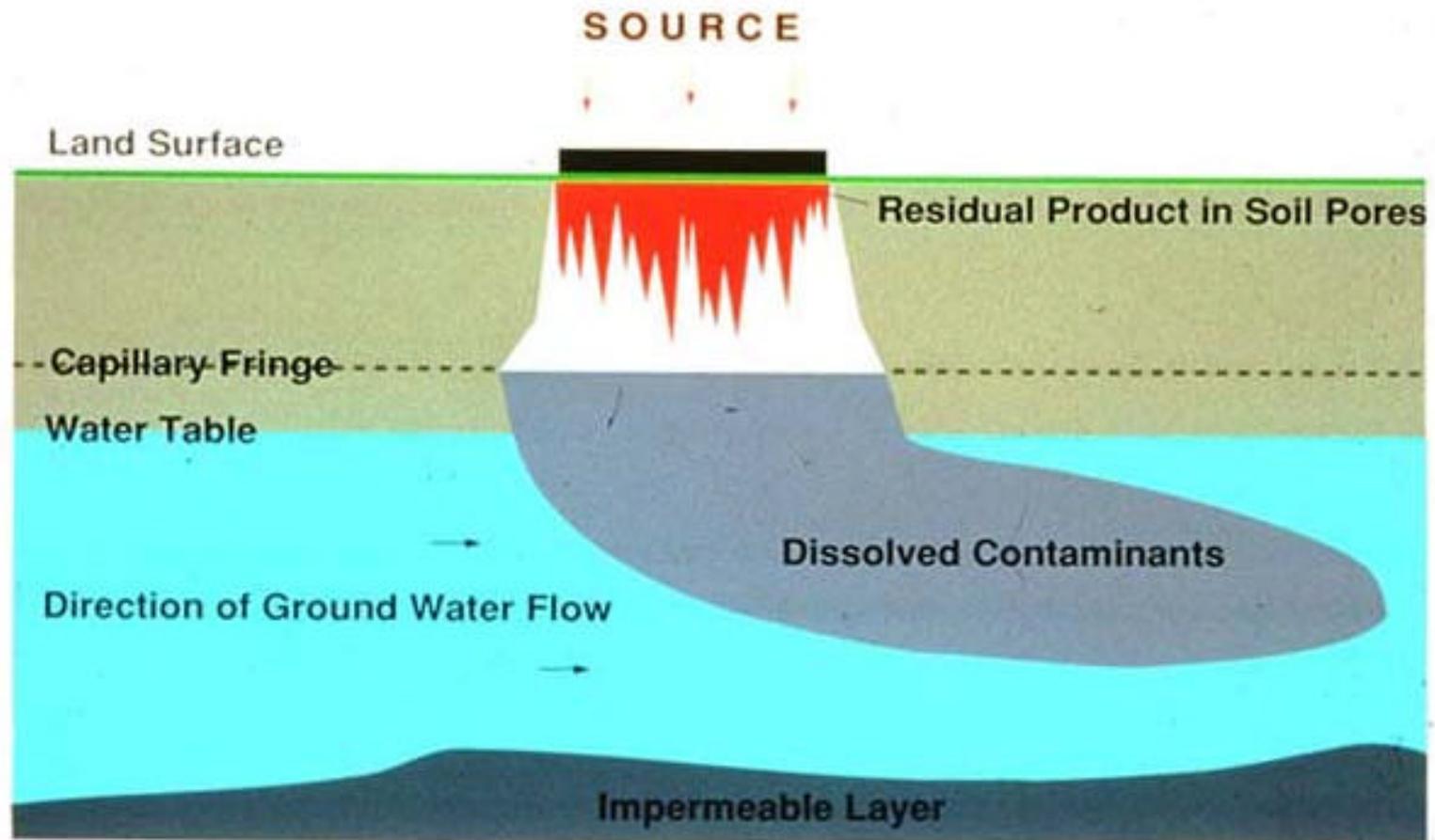
Sistema Bidimensional, Inyección Continua de Contaminante (Condición de Borde de Tercer Tipo)

Si el trazador o contaminante se inyecta en forma continua en un flujo uniforme se formará una pluma de contaminante, la que a medida que se mueve a través del medio poroso se dispersa en las direcciones longitudinal y transversal.



CI66J

Sistema Bidimensional, Inyección Continua de Contaminante (Condición de Borde de Tercer Tipo)



Sistema Bidimensional, Inyección Continua de Contaminante (Condición de Borde de Tercer Tipo)

Para este análisis se supone que la fuente de contaminante se encuentra en un punto ubicado en el origen ($x = 0, y = 0$), y el acuífero se caracteriza por un flujo uniforme, v_x , orientado en la dirección x . Existe una inyección continua de contaminante con una concentración C_0 y a una tasa Q .

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

Condiciones iniciales:

$$C(x, y, 0) = 0 \quad -\infty < x < \infty \quad -\infty < y < \infty$$



Sistema Bidimensional, Inyección Continua de Contaminante (Condición de Borde de Tercer Tipo)

Para este análisis se supone que la fuente de contaminante se encuentra en un punto ubicado en el origen ($x = 0$, $y = 0$), y el acuífero se caracteriza por un flujo uniforme, v_x , orientado en la dirección x . Existe una inyección continua de contaminante con una concentración C_0 y a una tasa Q .

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

Condiciones de borde:

$$\left(-D_L \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + v_x \cdot C \right)_{x=0, y=0} = C_0 \cdot Q \quad t > 0$$

$$C(-\infty, y, t) = C(\infty, y, t) = C(x, \infty, t) = C(x, -\infty, t) = 0 \quad t > 0$$



Sistema Bidimensional, Inyección Continua de Contaminante (Condición de Borde de Tercer Tipo)

Este problema fue resuelto por Bear (1972) para una condición estacionaria, en la cual el crecimiento de la pluma se ha estabilizado. Esta solución tiene la siguiente expresión:

$$C(x, y) = \frac{C_0 \cdot Q}{2 \cdot p \cdot \sqrt{D_L \cdot D_T}} \cdot \exp\left(\frac{v_x \cdot x}{2 \cdot D_L \cdot D_T}\right) \cdot K_0(B)$$

donde $K_0(x)$ es la función de Bessel modificada de segundo tipo y orden cero. El argumento B está dado por:

$$B = \sqrt{\frac{v_x^2}{4 \cdot D_L}} \cdot \sqrt{\frac{x^2}{D_L} + \frac{y^2}{D_T}}$$

Bear (1972)



Sistema Bidimensional, Inyección Continua de Contaminante (Condición de Borde de Tercer Tipo)

Una solución para este mismo problema pero en régimen transiente fue obtenida por Y. Ensellem (1975). Esta solución tiene la siguiente expresión:

$$C(x, y) = \frac{C_0 \cdot Q}{2 \cdot p \cdot \sqrt{D_L \cdot D_T}} \cdot \exp\left(\frac{v_x \cdot x}{2 \cdot D_L \cdot D_T}\right) \cdot (W(0, B) - W(t, B))$$

donde $W(t, B)$ es la función de pozo derivada por Hantush.



Y. Ensellem (1975)

Sistema Bidimensional, Inyección Instantánea de Contaminante (Pulso de Contaminante)

Si se produce la inyección instantánea de contaminante en un sistema acuífero homogéneo, con un campo de velocidad uniforme el cual se orienta en la dirección x , el problema se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

$$C(x, y, 0) = 0 \quad -\infty < x < \infty \quad -\infty < y < \infty$$

$$C(x, y, 0) = C_0 \cdot \mathbf{d}(x - x_0, y - y_0)$$

$$C(-\infty, y, t) = C(\infty, y, t) = C(x, \infty, t) = C(x, -\infty, t) = 0 \quad t > 0$$



Sistema Bidimensional, Inyección Instantánea de Contaminante (Pulso de Contaminante)

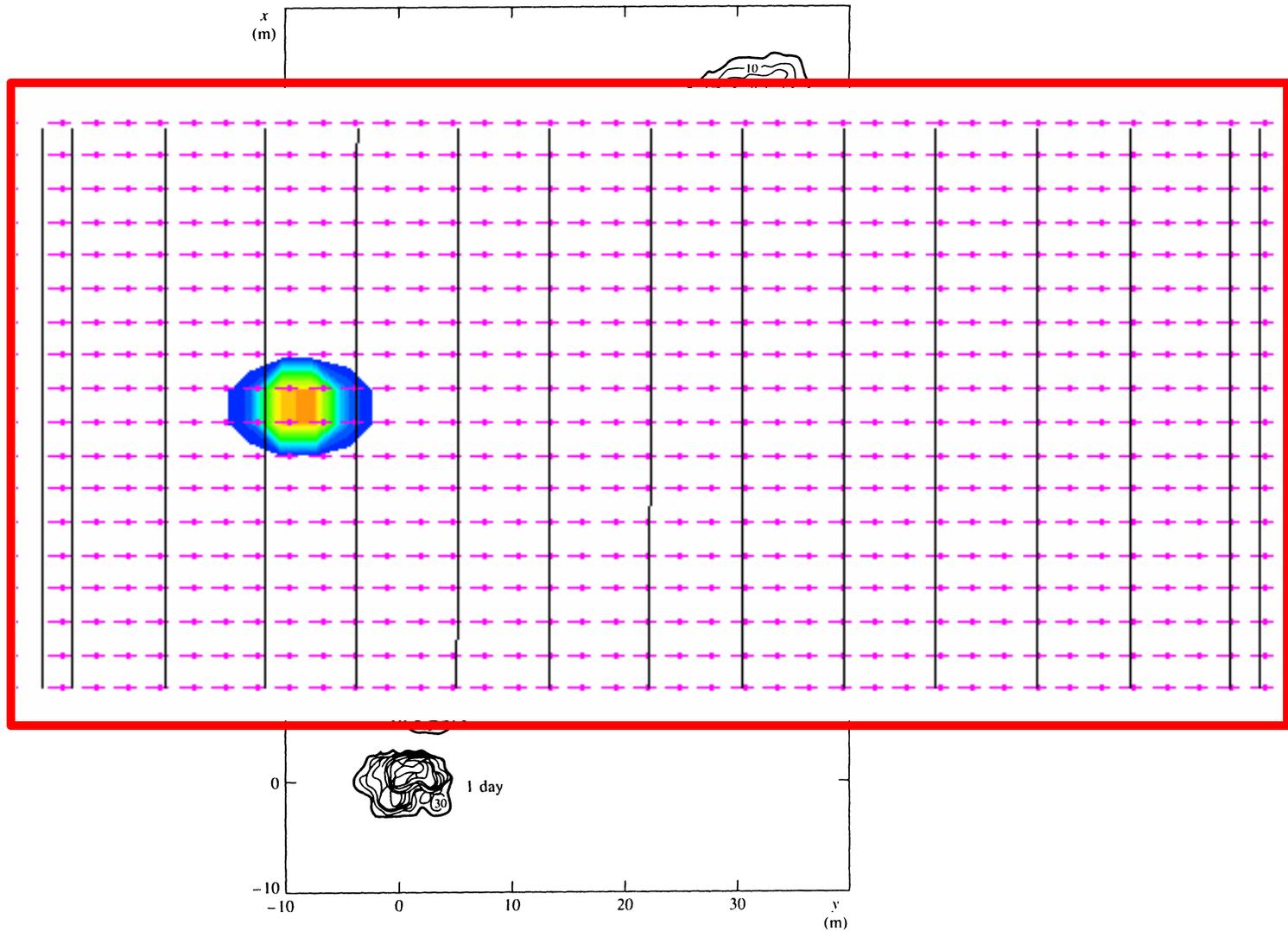
La solución de este problema fue obtenida por De Josselin De Jong (1958), considerando que la inyección se produce en el punto de coordenadas $x=x_0$ e $y=y_0$.

$$C(x, y, t) = \frac{C_0 \cdot A}{2 \cdot \rho \cdot t \cdot \sqrt{D_L \cdot D_T}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - v_x \cdot t - x_0)^2}{4 \cdot D_L \cdot t} - \frac{(y - y_0)^2}{4 \cdot D_T \cdot t}\right)$$

De Josselin De Jong (1958)



DESCARGA INSTANTANEA



CI66J

INTRODUCCION

FUENTES DE CONTAMINACION

GENERALIDADES

CARACTERISTICAS

CATEGORIAS

PROCESOS DE TRANSPORTE DE MASAS

DERIVACION ECUACION DE TRANSPORTE

EC. ADVECCION-DISPERSION

SOLUCIONES ANALITICAS 1D

SOLUCIONES ANALITICAS 2D

EC. ADVECCION-DISPERSION-REACCION

REACCION DE PRIMER ORDEN

DETERMINACION DE DISPERSIVIDAD



CI66J

Las ecuaciones presentadas hasta este punto describen los procesos de advección, dispersión mecánica y difusión.

Si existen reacciones químicas o biológicas, la ecuación básica debe ser modificada agregando términos que incluyan la existencia de fuentes o sumideros.

El esquema de balance de masas que describe esta nueva condición es:

$$\begin{array}{l} \text{Cambio en el} \\ \text{almacenamiento} \\ \text{de masa} \end{array} = \begin{array}{l} \text{masa} \\ \text{que} \\ \text{entra} \end{array} - \begin{array}{l} \text{masa} \\ \text{que} \\ \text{sale} \end{array} \pm \begin{array}{l} \text{masa} \\ \text{producida o} \\ \text{consumida} \end{array}$$



En el caso del problema de transporte de una sustancia contaminante no conservativa, es decir que es afectada por reacciones químicas, se puede escribir como una modificación de la ecuación de Advección-Dispersión:

$$D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \pm \frac{r}{n} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

donde r representa la masa producida o consumida por unidad de volumen y unidad de tiempo, y n es la porosidad. La ecuación anterior se conoce comúnmente como ecuación de Advección-Dispersión-Reacción.



CI66J

INTRODUCCION

FUENTES DE CONTAMINACION

GENERALIDADES

CARACTERISTICAS

CATEGORIAS

PROCESOS DE TRANSPORTE DE MASAS

DERIVACION ECUACION DE TRANSPORTE

EC. ADVECCION-DISPERSION

SOLUCIONES ANALITICAS 1D

SOLUCIONES ANALITICAS 2D

EC. ADVECCION-DISPERSION-REACCION

REACCION DE PRIMER ORDEN

DETERMINACION DE DISPERSIVIDAD



REACCIONES CINÉTICAS DE PRIMER ORDEN

Ejemplos de una reacción cinética de primer orden son el decaimiento radioactivo y la biodegradación. Esta reacción se puede escribir como:

$$r = \frac{d(n \cdot C)}{dt} = -I \cdot n \cdot C$$

donde I es la constante de decaimiento de primer orden, la que tiene unidades de tiempo⁻¹. Con esta reacción la ecuación de transporte reactivo (Advección-Dispersión-Reacción) se puede escribir como:

$$D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - I \cdot C = \frac{\partial C}{\partial t}$$



Columna Unidimensional, Inyección Instantánea de Contaminante con Decaimiento Lineal (Pulso de Contaminante)

Si se realiza una inyección instantánea de contaminante se producirá un avance gradual de éste, el cual será afectado por un proceso de decaimiento. La ecuación diferencial que describe este problema, junto a las condiciones de borde e iniciales, es la siguiente:

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - I \cdot C = \frac{\partial C}{\partial t}$$

$$C(x,0) = C_0 \cdot d(x)$$

$$C(-\infty, t) = 0 \quad t > 0$$

$$C(\infty, t) = 0 \quad t > 0$$



Columna Unidimensional, Inyección Instantánea de Contaminante con Decaimiento Lineal (Pulso de Contaminante)

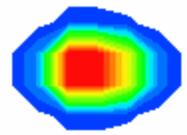
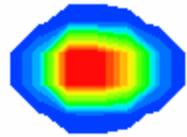
La solución al problema anterior queda representada por:

$$C(x, t) = \frac{M}{\sqrt{2 \cdot p \cdot D_x \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - v_x \cdot t)^2}{4 \cdot D_x \cdot t}\right) \cdot \exp(-I \cdot t)$$

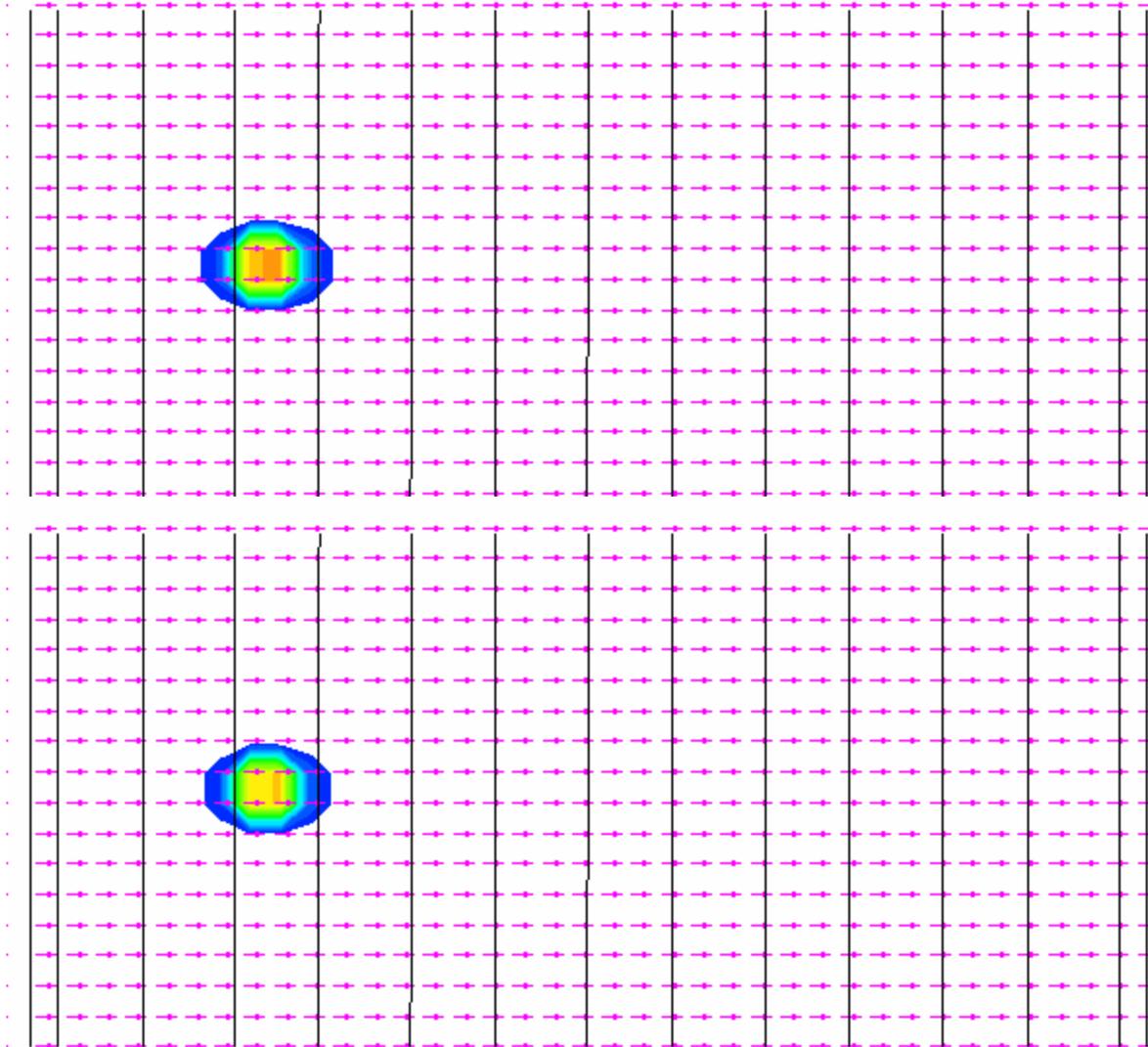
donde M es la masa inyectada por unidad de área



DESCARGA CONTINUA



DESCARGA INSTANTANEA



CI66J

INTRODUCCION

FUENTES DE CONTAMINACION

GENERALIDADES

CARACTERISTICAS

CATEGORIAS

PROCESOS DE TRANSPORTE DE MASAS

DERIVACION ECUACION DE TRANSPORTE

EC. ADVECCION-DISPERSION

SOLUCIONES ANALITICAS 1D

SOLUCIONES ANALITICAS 2D

EC. ADVECCION-DISPERSION-REACCION

REACCION DE PRIMER ORDEN

DETERMINACION DE DISPERSIVIDAD



CI66J

Para aplicar las diferentes soluciones para los problemas de transporte de contaminantes, ya sean estos en 1D, 2D o 3D, se requiere el conocimiento de dos parámetros básicos: la velocidad de escurrimiento y el coeficiente de dispersión.

La velocidad de escurrimiento se obtiene a partir de datos de conductividad hidráulica, gradientes hidráulicos y porosidad de la formación acuífera.

El coeficiente de dispersión requiere el desarrollo de experiencias específicas a partir de las cuales se pueda estimar.

Generalmente en las experiencias de laboratorio se estima el coeficiente de dispersión, D , o el coeficiente de dispersividad, α .



Las técnicas para estimar dispersividad pueden ser englobadas en tres grandes grupos:

–**LABORATORIO:** trazadores (color, salinos, radioactivos) son incorporados en columnas de suelo para evaluar el coeficiente de dispersión mediante la comparación de soluciones analíticas para casos simples.

–**TERRENO:** uso de un pozo único (de inyección y bombeo) para inducir un escurrimiento controlado e incorporar un trazador. Uso de soluciones analíticas adecuadas permite estimar valor de este coeficiente.

–**BIBLIOGRÁFICAS (EFECTO ESCALA):** uso de información bibliográfica para estimar coeficiente de dispersión a partir de bases de datos. Util en el caso de no disponer de otros datos.



CI66J

INTRODUCCION

FUENTES DE CONTAMINACION

GENERALIDADES

CARACTERISTICAS

CATEGORIAS

PROCESOS DE TRANSPORTE DE MASAS

DERIVACION ECUACION DE TRANSPORTE

EC. ADVECCION-DISPERSION

SOLUCIONES ANALITICAS 1D

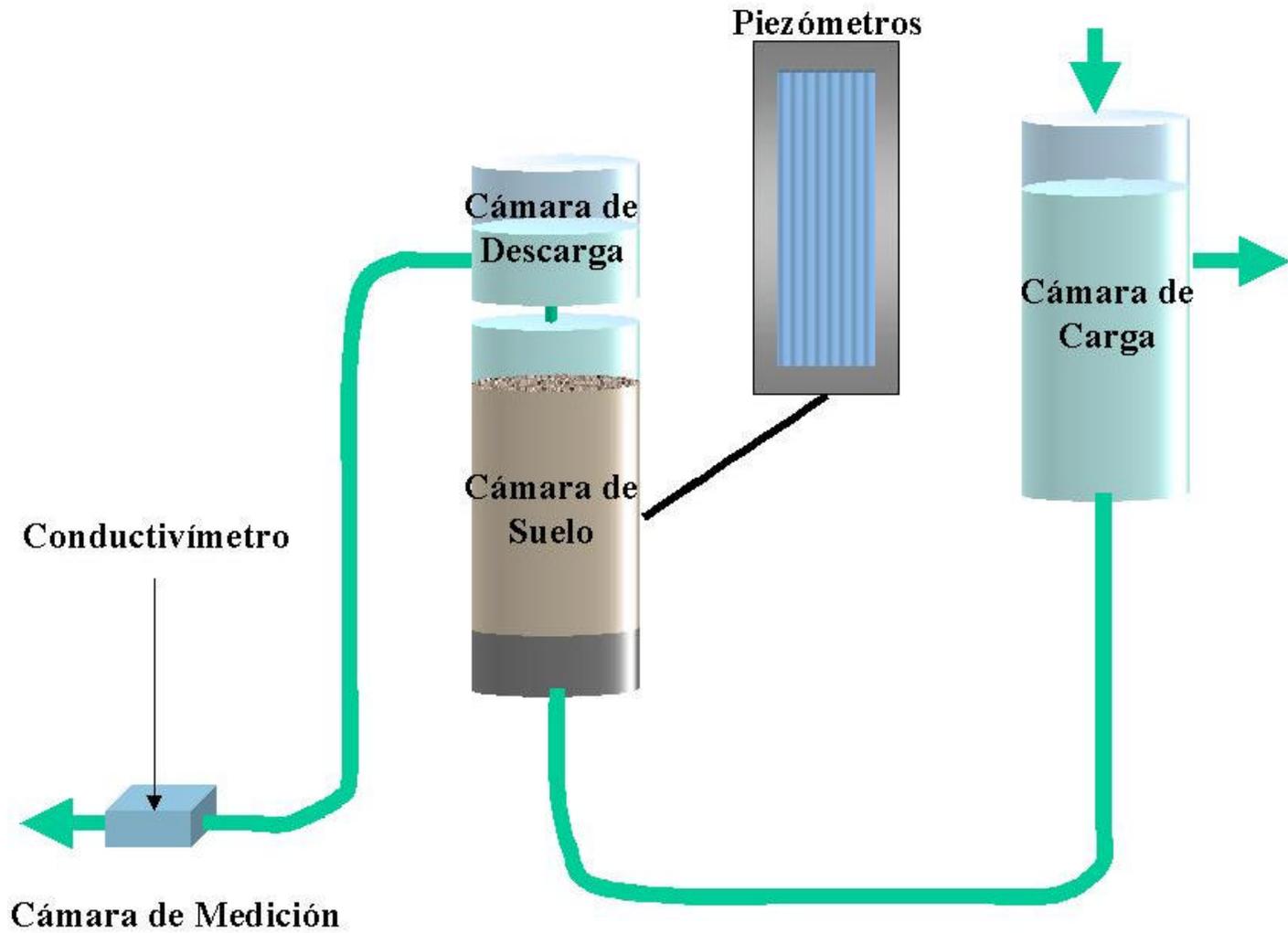
SOLUCIONES ANALITICAS 2D

EC. ADVECCION-DISPERSION-REACCION

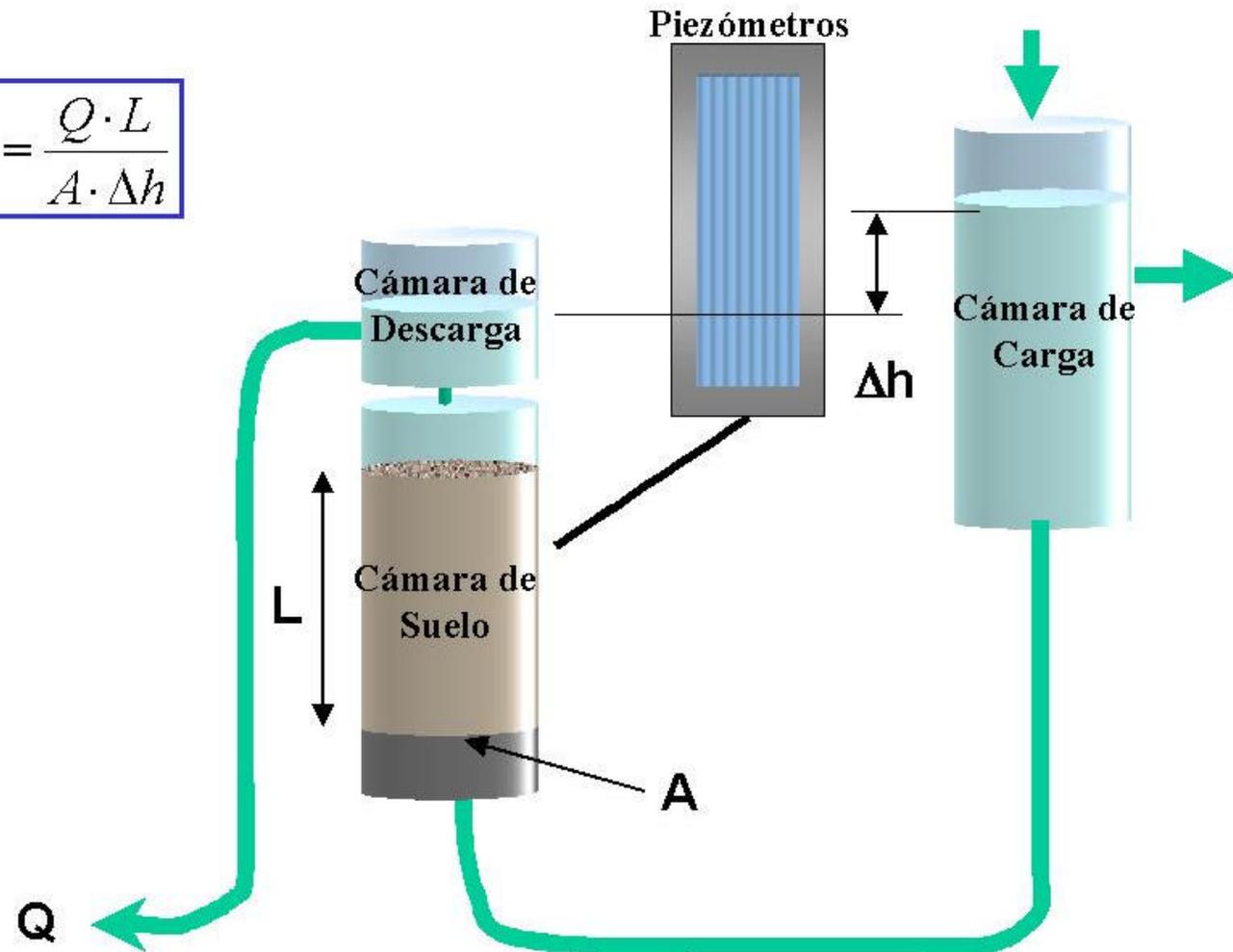
REACCION DE PRIMER ORDEN

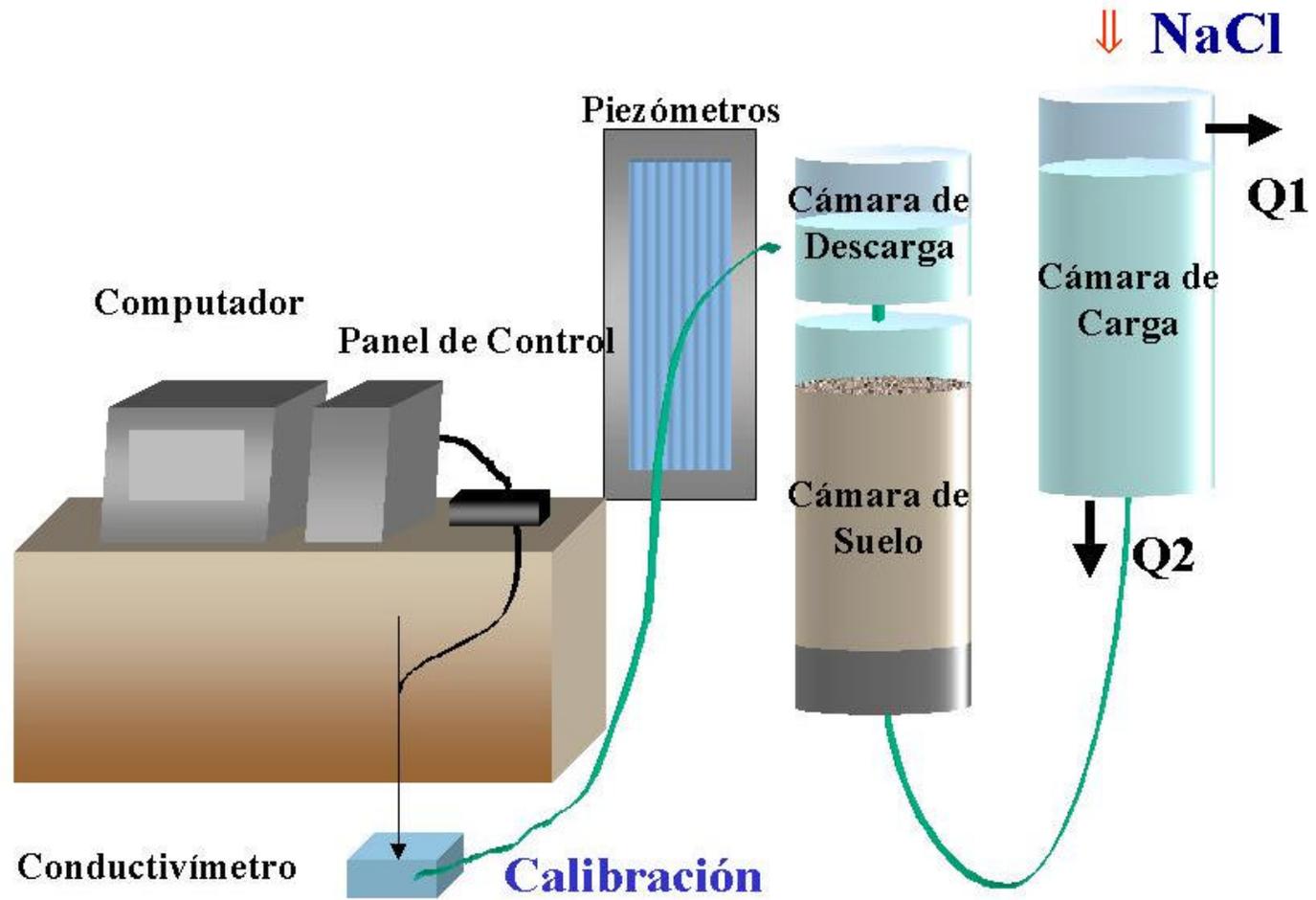
DETERMINACION DE DISPERSIVIDAD



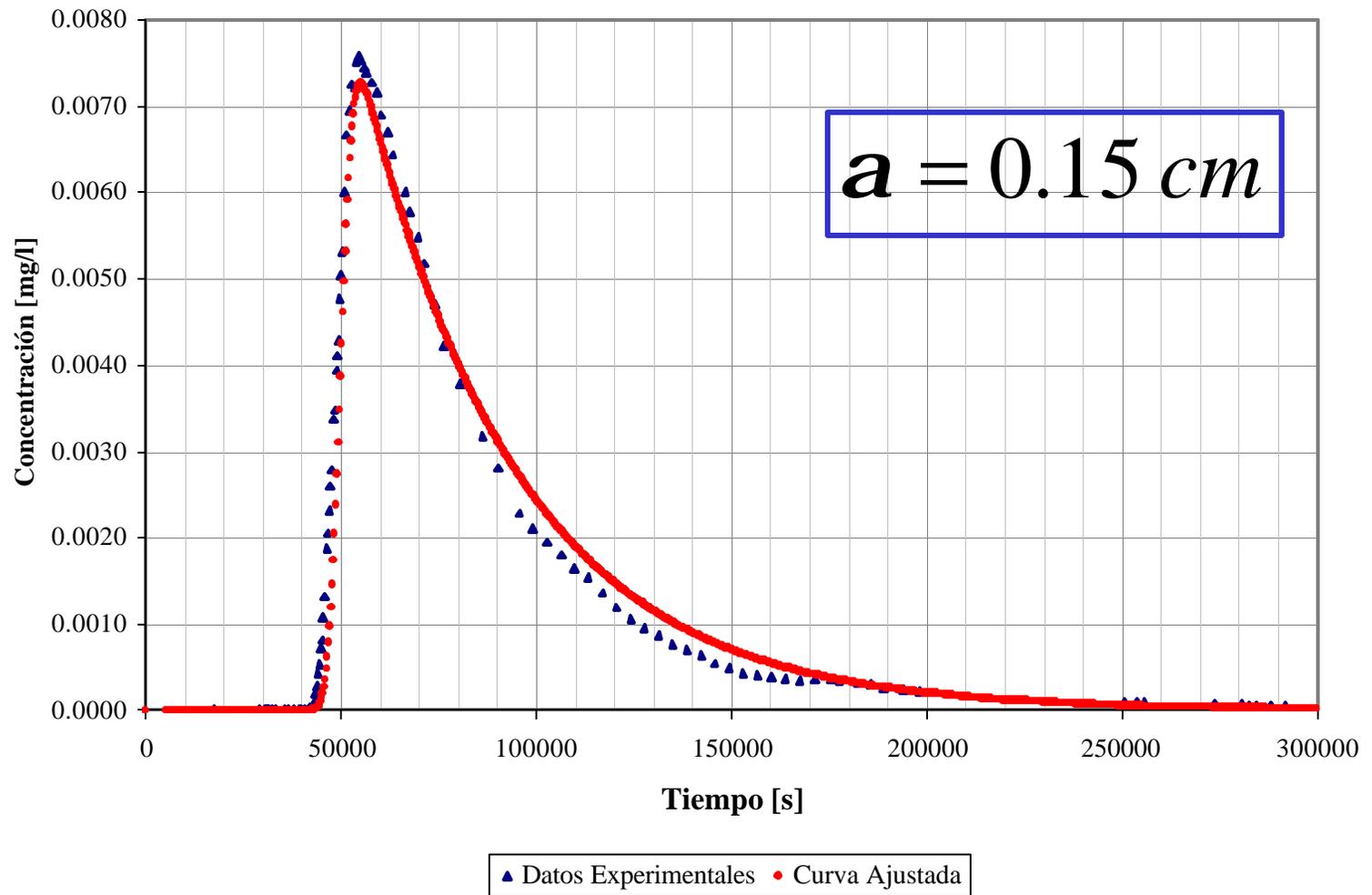


$$K = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta h}$$





CI66J



CI66J

INTRODUCCION

FUENTES DE CONTAMINACION

GENERALIDADES

CARACTERISTICAS

CATEGORIAS

PROCESOS DE TRANSPORTE DE MASAS

DERIVACION ECUACION DE TRANSPORTE

EC. ADVECCION-DISPERSION

SOLUCIONES ANALITICAS 1D

SOLUCIONES ANALITICAS 2D

EC. ADVECCION-DISPERSION-REACCION

REACCION DE PRIMER ORDEN

DETERMINACION DE DISPERSIVIDAD



CI66J

Se utiliza un pozo en el cual se inyecta agua que contiene un contaminante conservativo.

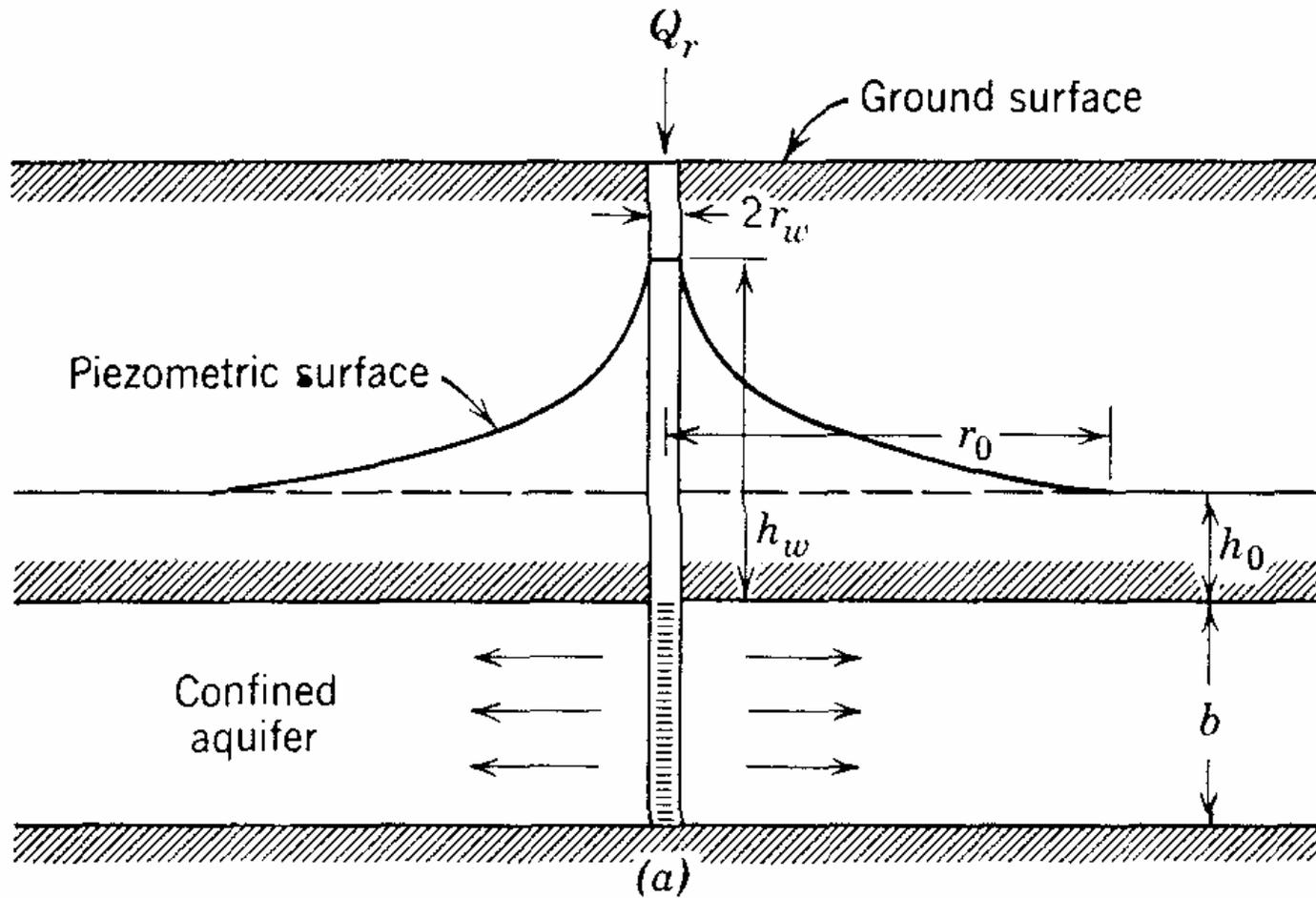
Durante un tiempo definido, T_{INY} , se inyecta un trazador conservativo al interior del acuífero. Pasado ese tiempo se comienza a extraer agua a una tasa constante.

Para este análisis se define R_F como la posición del frente de avance del agua inyectada, al final del período de inyección:

$$R_F = \left(\frac{Q \cdot T_{INY}}{p \cdot b \cdot n} \right)^{\frac{1}{2}}$$

donde Q es la tasa de inyección, T_{INY} es el tiempo total de inyección, b es el espesor del acuífero, y n es la porosidad.





CI66J

La ecuación diferencial que describe este problema fue derivada y resuelta por Hoopes y Harleman (1967):

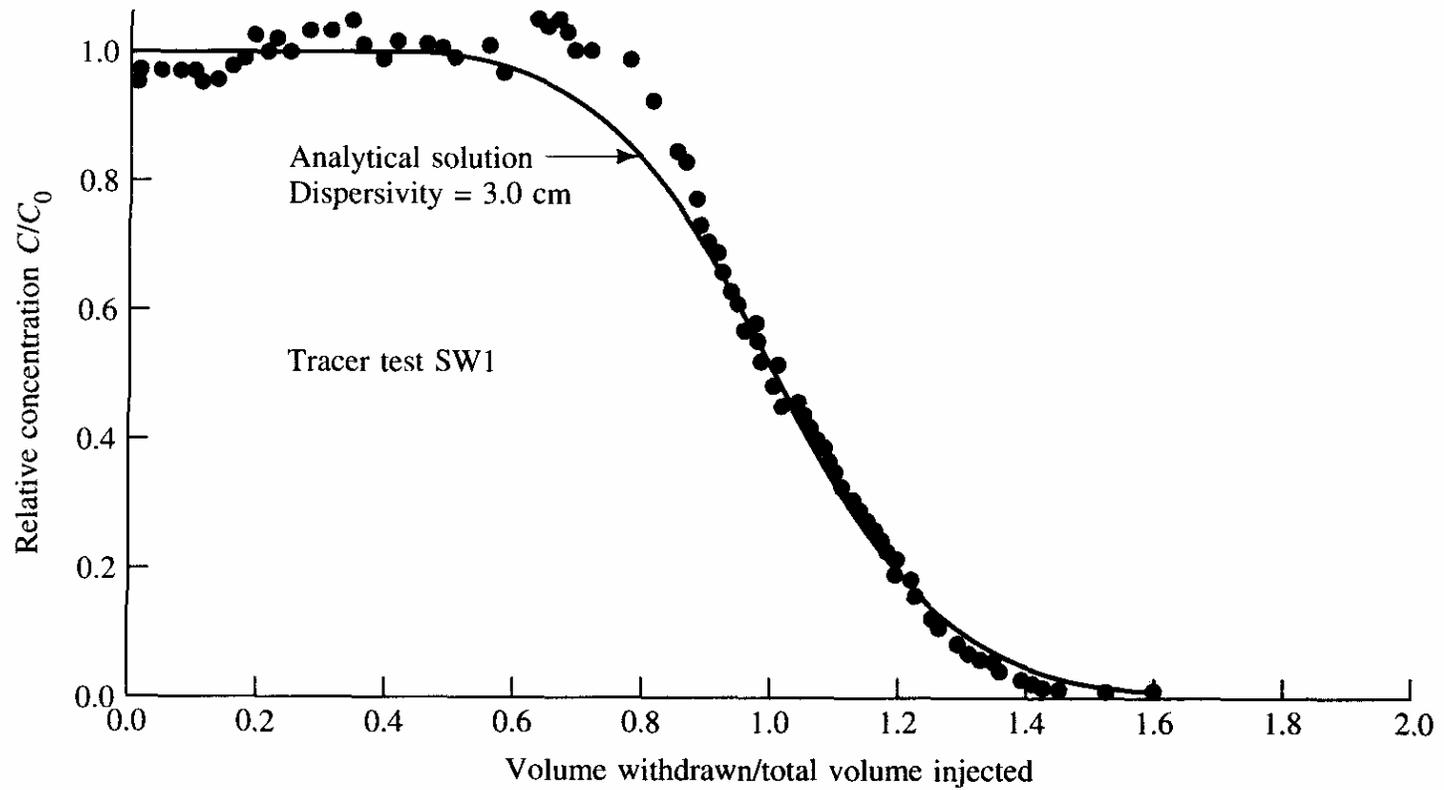
$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial C}{\partial r} = a_L \cdot u \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{D^*}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial C}{\partial r} \right)$$

La solución de este problema se obtuvo al despreciar el efecto de la difusión molecular, al ser ésta mucho más pequeña que la dispersión mecánica.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{(U_p - U_i) - 1}{\left\{ \frac{16}{3} \cdot \frac{a_L}{R_F} \cdot \left(2 - \left[1 - \frac{U_p}{U_i} \right] \right)^{1/2} \cdot \left(1 - \frac{U_p}{U_i} \right) \right\}^{1/2}} \right)$$

donde U_p es el volumen de agua extraído durante un tiempo definido, U_i es el volumen de agua inyectada durante la experiencia





CI66J

INTRODUCCION

FUENTES DE CONTAMINACION

GENERALIDADES

CARACTERISTICAS

CATEGORIAS

PROCESOS DE TRANSPORTE DE MASAS

DERIVACION ECUACION DE TRANSPORTE

EC. ADVECCION-DISPERSION

SOLUCIONES ANALITICAS 1D

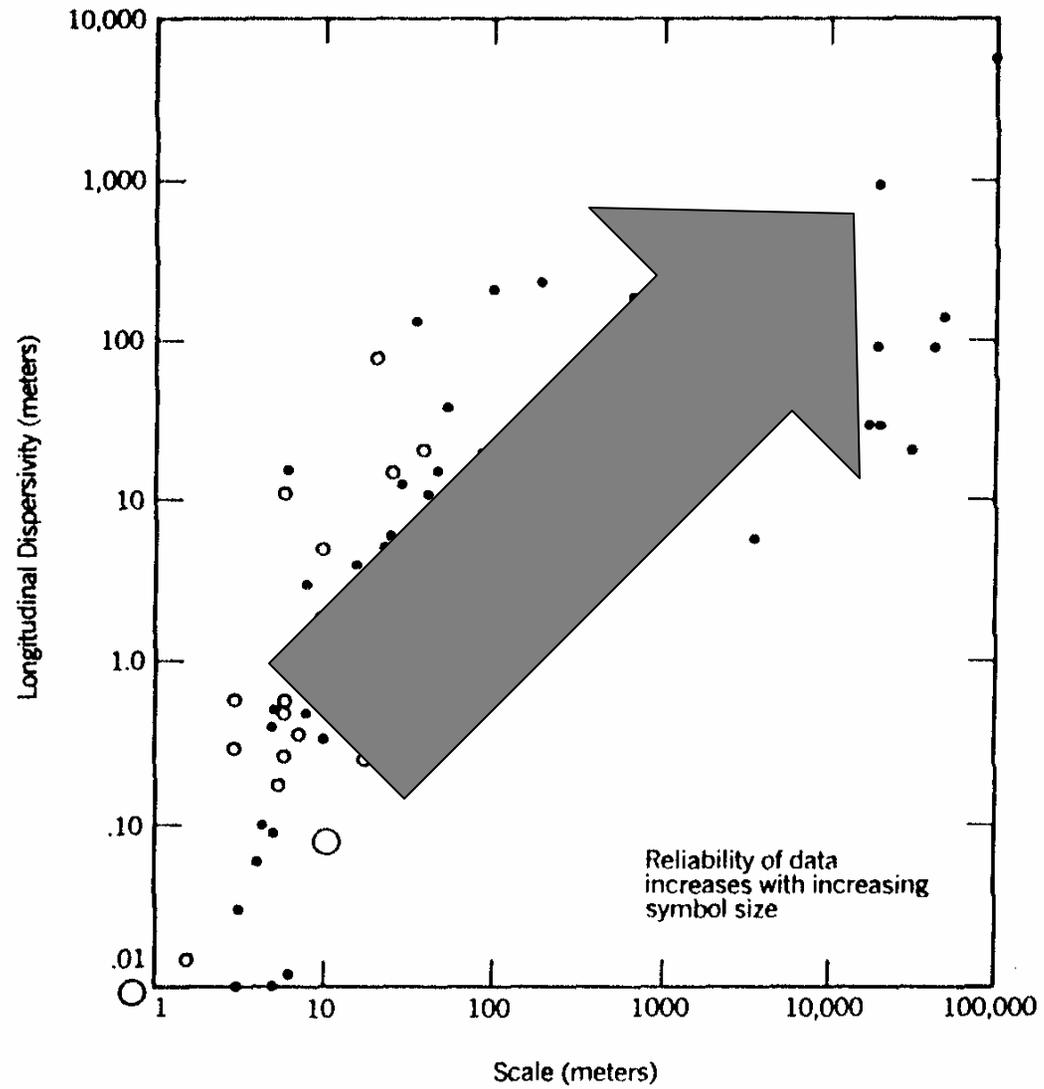
SOLUCIONES ANALITICAS 2D

EC. ADVECCION-DISPERSION-REACCION

REACCION DE PRIMER ORDEN

DETERMINACION DE DISPERSIVIDAD





CI66J

A partir de los datos de Gelhar:

$$a_L = 0.1 \cdot L$$

Para longitudes menores a 3.500 m, Neuman obtuvo:

$$a_L = 0.175 \cdot L^{1.46}$$

Xu y Einstein desarrollaron un estudio estadístico:

$$a_L = 0.83 \cdot (\text{Log } L)^{2.414}$$

