

FIGURA 2.
ESQUEMA MALLA
DE ELEMENTOS FINITOS

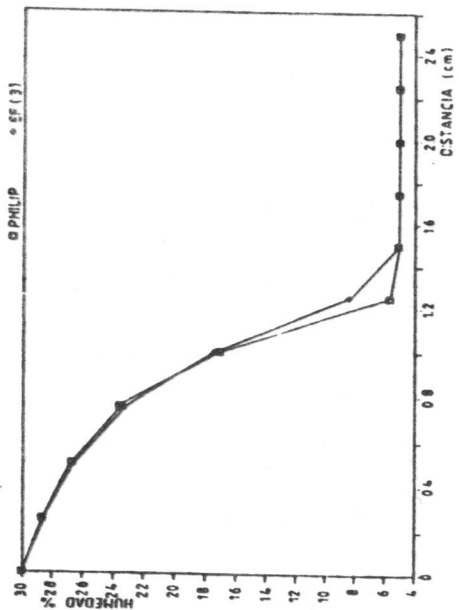


FIGURA 3 VALIDACION MODELO SIMULACION DEL FLUJO
HUMEDAD VS DISTANCIA $T_s = 2 \text{ min}$

DISPERSION DE CONTAMINANTES EN UN MEDIO POROSO NO SATURADO

II. MODELO DE SIMULACION DEL TRANSPORTE

GUILLERMO CARRERA F. (1)

CARLOS ESPINOZA C. (1)

RESUMEN

En este trabajo se presenta la conceptualización de los mecanismos de transporte de una sustancia contaminante que decae en el tiempo, a través de un medio poroso de características cohesivas, que se encuentra parcialmente saturado.

Mediante la aplicación de los métodos de elementos finitos y diferencias finitas a las ecuaciones diferenciales que gobiernan el fenómeno, se estructuró un modelo de simulación (TRANS). El buen ajuste conseguido en la validación teórica del modelo, demostró que las técnicas numéricas aplicadas son adecuadas.

Este modelo de transporte, en conjunto con otro definido en un trabajo anterior para representar el flujo (Cabrera y Espinoza, 1989), dan forma a un modelo general que permite estudiar los procesos de dispersión en medios no saturados.

La posibilidad del uso de una herramienta como ésta, abre buenas perspectivas para aplicaciones prácticas.

(1) Profesor e Investigador. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.

INTRODUCCION

En estudios de contaminación de aguas subterráneas provenientes de flujos que alcanzan las napas desde la superficie del suelo, el flujo y el transporte a través de la zona no saturada pueden ser muy importantes por el efecto de procesos tales como la adsorción, intercambio y decaimiento. Efectivamente, estos procesos producirán generalmente una disminución en la cantidad del contaminante que percola profundamente, aunque la cantidad retenida en la fase no saturada aumentará.

En un trabajo anterior se presentaron los resultados obtenidos de la validación teórica de un modelo de flujo no saturado, que fuera desarrollado sobre la base de un estudio conceptual de los procesos involucrados y aplicando la técnica numérica de los elementos finitos.

Para la modelación del transporte ese modelo es fundamental puesto que se requiere conocer las componentes de velocidad en el sistema así como la humedad o succión en el mismo, lo que se obtiene como respuesta del modelo de simulación del flujo.

En el presente trabajo, como una continuación del anterior, se ha desarrollado y validado teóricamente un modelo de simulación del transporte de un contaminante contenido en una solución que fluye por un medio no saturado. En esa simulación los procesos de adsorción y decaimiento radiactivo han sido considerados como actuando sobre las fases móvil e inmóvil que coexisten en cualquier flujo de este tipo, siendo especialmente importantes en medios porosos cohesivos.

FORMULACION MATEMATICA

El movimiento de una sustancia contaminante a través de un medio poroso es usualmente analizado a través de una ecuación de dispersión-advención, la cual se deriva a partir de un balance de masas practicado en un volumen de control infinitesimal. Al igual que en el caso del problema del flujo, el balance de masas planteado sobre un volumen de control indica que:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta \cdot C) = - \text{DIV} \cdot q_c \quad (1)$$

en que θ es el contenido total de agua en el medio poroso, C es la

concentración de contaminante y q_c es el flujo de contaminante que pasa a través de una unidad de área del medio poroso.

Existen tres procesos distintos que dan origen al transporte de un contaminante: un mecanismo difusivo, uno dispersivo y otro advectivo. El flujo total de contaminante q_c corresponderá por tanto a la superposición de ellos, esto es:

$$q_c = \theta \cdot C \cdot V_x n_x + \theta \cdot C \cdot V_z n_z - \theta \cdot a_x \cdot V_x \frac{\partial C}{\partial x} n_x - \theta \cdot a_z \cdot V_z \frac{\partial C}{\partial z} n_z - \theta \cdot D_d \cdot \frac{\partial C}{\partial x} n_x - \theta \cdot D_d \cdot \frac{\partial C}{\partial z} n_z \quad (2)$$

donde V_i y a_i son, respectivamente, la componente de velocidad y la dispersividad; n_i es un vector unitario normal a la dirección i . Por su parte, D_d , el coeficiente de difusión molecular, no depende de la dirección.

Al reemplazar (2) en (1) se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta \cdot C) = \frac{\partial}{\partial z} \left[\theta \cdot D_{hz} \frac{\partial C}{\partial z} - q_z \cdot C \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\theta \cdot D_{hx} \frac{\partial C}{\partial x} - q_x \cdot C \right] \quad (3)$$

siendo q_x y q_z las componentes de la velocidad aparente de Darcy según x y z , y en que se define las componentes del parámetro de dispersión hidrodinámica D_h así:

$$D_{hz} = a_z \cdot V + D_d \quad (4a)$$

$$D_{hx} = a_x \cdot V + D_d \quad (4b)$$

En general, en suelos agregados existe una distribución de poros bimodal, esto es, poros grandes y pequeños. Bajo condiciones no saturadas, los poros grandes están usualmente con aire, existiendo agua únicamente en sus paredes en forma de una película que los cubre, debido a la acción de las fuerzas matriciales sobre las moléculas dipolares de agua (adsorción). Así, el transporte de un contaminante se verifica principalmente en los poros más pequeños, los cuales se encuentran llenos de agua. De esta manera, es posible identificar dos regiones en un suelo: una región es la zona primaria del flujo

que transporta al contaminante (fase móvil) y la otra es una zona en que el agua está estancada (fase inmóvil).

De este modo, las ecuaciones que describen el transporte de un contaminante en un sistema no saturado consisten en una ecuación clásica de dispersión-advención para la fase móvil, como la planteada en (3) y una ecuación que describe la transferencia de soluto entre las fases móvil e inmóvil:

$$\frac{\delta}{\delta t} (\theta_m C_m) - \text{DIV} \left[\theta_m D_h \text{GRAD}(C_m) - q C_m \right] + F_{im} \quad (5)$$

$$\frac{\delta}{\delta t} (\theta_{im} C_{im}) = - F_{im} \quad (6)$$

donde θ_m y θ_{im} son las humedades en las fases móvil e inmóvil del fluido, C_m y C_{im} son las concentraciones de contaminante presente en cada fase del fluido. El parámetro D_h de dispersión hidrodinámica es un tensor de orden 2 cuyas componentes principales son las especificadas en (4). El término q representa un vector de dos componentes, q_z y q_x . La expresión F_{im} indica la tasa neta a la cual el contaminante se desplaza desde la fase inmóvil a la móvil. Este término se puede expresar como:

$$F_{im} = \alpha_d (C_{im} - C_m) \quad (7)$$

donde α_d es un coeficiente de transferencia que depende del coeficiente de difusión molecular D_d , y de la geometría del área de contacto de las fases móvil e inmóvil.

El intercambio de masa de la solución líquida con el medio granular, que define las cantidades de componente adsorbido, puede representarse con las denominadas isoterma de adsorción. De esta forma, si se llama S a la concentración de contaminante adsorbido y C a la concentración del contaminante en el fluido, una isoterma es en general una relación del tipo $S = f(C)$, en que $f(C)$ indica la forma de la relación existente entre S y C .

Aunque este proceso ha intentado ser caracterizado como permanente e impermanente, su representación clásica supone que se efectúa bajo condiciones de equilibrio; esto es, al contactarse el fluido con un medio granular, este

proceso de traspaso de masa se realiza en un tiempo prácticamente despreciable. Las isotermas de equilibrio más usadas son las de Freundlich, Langmuir y Lineal, cuyas expresiones matemáticas se indican a continuación:

$$\text{- Freundlich (1926)} \quad S = k_1 C^{k_2} \quad (8)$$

$$\text{- Langmuir (1916)} \quad S = \frac{k_1 C}{1 + k_2 C} \quad (9)$$

$$\text{- Isoterma lineal} \quad S = k_1 C + k_2 \quad (10)$$

en donde k_1 y k_2 son constantes.

Relacionando lo anterior con las expresiones (5) y (6), y despreciando el posible efecto directo de la fase sólida sobre el fluido de la fase móvil, se obtienen las siguientes relaciones:

$$\frac{\delta}{\delta t} (\theta_m C_m) - \text{DIV} \left[\theta_m D_h \text{GRAD}(C_m) - q C_m \right] + \alpha_d (C_{im} - C_m) \quad (11)$$

$$\frac{\delta}{\delta t} (\theta_{im} C_{im}) + \frac{\delta}{\delta t} (F_v \rho_s S_{im}) = -\alpha_d (C_{im} - C_m) \quad (12)$$

en que F_v es el porcentaje en volumen de sólido ($F_v = 1 - n$, en que n es la porosidad), ρ_s es su densidad y S_{im} la concentración de contaminante adsorbida desde la fase inmóvil del fluido.

Hasta el momento se ha considerado un elemento contaminante conservativo, que sufre adsorción, aunque no se degrada. En el caso particular del comportamiento de contaminantes de tipo radiactivo, los cuales sufren un decaimiento paulatino de su actividad, se produce un cambio en su estado atómico, y por lo tanto, son eliminados físicamente como contaminantes.

Analizado desde el punto de vista anterior, el decaimiento que experimenta el componente se explica como una eliminación desde el volumen de control. Así, tanto para la cantidad de contaminante en el medio poroso como en el granular, es posible escribir:

$$\frac{\delta M_m}{\delta t} = - \text{dec} \cdot \left[\theta_m C_m \right] \quad (14)$$

$$\frac{\partial C_{im}}{\partial t} = -dec \left[\theta_{im} C_{im} + Fv \int v \cdot Sim \right] \quad (15)$$

en que $dec = 1/T$ y T es el período de semidesintegración o tiempo medio de vida del elemento contaminante radiactivo.

Considerando (14) y (15) en las ecuaciones (12) y (13) respectivamente, se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta_{im} C_{im}) = \text{DIV} \left[\theta_{im} D_{iv} \text{GRAD}(C_{im}) - q C_{im} \right] + \alpha d \cdot (C_{im} - C_m) - dec \cdot (\theta_{im} C_{im}) \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\theta_{im} C_{im}) + \frac{\partial}{\partial t} (Fv \int v \cdot Sim) = & -\alpha d \cdot (C_{im} - C_m) - \\ & - dec \cdot (\theta_{im} C_{im} + Fv \int v \cdot Sim) \end{aligned} \quad (17)$$

Las ecuaciones (16) y (17) representan los distintos procesos que experimenta una sustancia contaminante de tipo radiactiva a través de su paso por el medio poroso.

En cuanto a las condiciones de borde, estas pueden ser del siguiente tipo:

- Borde de Concentración Conocida, o de Dirichlet
- Borde de flujo conocido, o de Neumann, la que puede escribirse:

$$(C_m - q - \theta_{im} D_{iv} \text{GRAD}(C_{im})) \cdot n_s = q C^* \quad (18)$$

en que puesto que C_m y $\text{GRAD}(C_{im})$ se encuentran mezclados, correspondería realmente a una condición de tercer tipo o de Cauchy.

ALGORITMO NUMERICO

La estructuración del modelo de simulación que describe el transporte de una sustancia contaminante a través de un medio poroso no saturado, tiene como base las expresiones (16) y (17).

En el caso de la expresión (16), esta puede expresarse como un operador diferencial en términos de las variables de estado C_m y C_{im} , de tal forma que:

428

$$\begin{aligned} L(C_m, C_{im}) = & \frac{\partial}{\partial t} (\theta_{im} C_{im}) - \frac{\partial}{\partial z} \left[\theta_{im} D_{iz} \frac{\partial C_{im}}{\partial z} - qz C_{im} \right] - \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left[\theta_{im} D_{ix} \frac{\partial C_{im}}{\partial x} - qx C_{im} \right] - \alpha d \cdot (C_{im} - C_m) + dec \cdot (\theta_{im} C_{im}) \end{aligned} \quad (19)$$

Si la región en estudio se particiona mediante una malla de elementos finitos triangulares, las variables de estado C_m y C_{im} , pueden ser representadas en el interior de un elemento e en función de sus valores nodales, así como de las funciones de interpolación N_p seleccionadas (Cabrera y Azzari, 1979). De acuerdo a esto:

$$\bar{C}_m = \sum N_p \bar{C}_m \quad (20a)$$

$$\bar{C}_{im} = \sum N_p \bar{C}_{im} \quad (20b)$$

La aplicación del método de elementos finitos, en conjunto con el método residual de Galerkin conduce a la ecuación matricial (21), la cual posteriormente se puede desarrollar mediante un esquema de diferencias finitas hacia atrás o implícito:

$$\left[A \right] \frac{d}{dt} (\bar{\theta}_{im} \bar{C}_{im}) + \left[B \right] (\bar{C}_m) + \left[C \right] (\bar{C}_{im}) = 0 \quad (21)$$

en que:

$$a(i, j) = \sum_e \int_{Re}^{NEL} N_i \cdot N_j \, dRe \quad (22a)$$

$$\begin{aligned} b(i, j) = & \sum_e \int_{Re}^{NEL} \left[\theta_{im} (D_{iz} b_i \cdot b_j + D_{ix} c_i \cdot c_j) \right] \cdot \int_{Re} dRe + \\ & + \left[qz \cdot b_j + qx \cdot c_j \right] \cdot \int_{Re} N_i \cdot dRe + \left[\alpha d + dec \cdot \theta_{im} \right] \cdot \int_{Re} N_i \cdot N_j \, dRe \end{aligned} \quad (22b)$$

$$c(i, j) = - \sum_e \int_{Re}^{NEL} \alpha d \cdot N_i \cdot N_j \, dRe \quad (22c)$$

429

Por su parte, la ecuación (17) no contiene términos especiales por lo cual su desarrollo posterior se realiza para un nudo particular k , obteniéndose luego de ensamblar las NUD expresiones el siguiente sistema matricial:

$$C_{im} = [E] \cdot (C_m) + [F] \cdot (S_{im}) + (g) \quad (23)$$

en que (E) y (F) son matrices diagonales de dimensiones NUD x NUD, cuyos términos centrales son:

$$e(i,i) = \alpha d/W \quad (24a)$$

$$f(i,i) = -F_v \rho \left[\frac{1}{\tau} + dec \right] / W \quad (24b)$$

$$g(i) = \frac{1}{\tau} \left[F_v \rho S_{im}^{t-1} + \theta_{im} \cdot C_{im}^{t-1} \right] / W \quad (24c)$$

$$W = \alpha d + dec \cdot \theta_{im} + \theta_{im} / \tau \quad (24d)$$

en que el superíndice t indica el intervalo de tiempo considerado.

Combinando las ecuaciones (21) y (23) se obtiene la siguiente expresión:

$$[A'] \cdot (C_m)^t + [B'] \cdot (S_m)^t + [C'] \cdot (S_{im})^t = (d') \quad (25)$$

en que A' , B' y C' son matrices de dimensiones NUD x NUD, mientras que d' es un vector de dimensión NUD x 1. Las expresiones de A' , B' y C' y d' son las siguientes:

$$A' = \frac{A \cdot \theta_m}{\tau} + B + C \cdot E \quad (26a)$$

$$B' = D \left[\frac{1}{\tau} + dec \right] \quad (26b)$$

$$C' = C \cdot F \quad (26c)$$

$$d' = \frac{1}{\tau} \left[A \theta_m^{t-1} + D S_m^{t-1} \right] - C \cdot G \quad (26d)$$

Ahora bien, de acuerdo a lo planteado en (8), (9) y (10), existe una relación entre las componentes adsorbidas (S) y la concentración de contaminante en el fluido (C). Esta relación, que en general es no lineal, puede ser expresada en términos globales como $S_{im} = f(C_{im})$, en que f corresponde al tipo de isoterma con la que se modela el fenómeno de adsorción. Desarrollando la expresión (25) se obtiene finalmente:

$$[A'] \cdot (C_m)^t = (d') - [B'] \cdot f(C_m)^t - [C'] \cdot f(C_{im})^t \quad (27)$$

cuya resolución debe ser realizada siguiendo un procedimiento de tipo iterativo, debido a que el vector del lado derecho de (27) depende del estado del sistema en el tiempo t , lo cual es justamente lo que se pretende obtener.

La incorporación de una condición de borde de flujo o de tipo Neumann en un problema de transporte se consigue con la evaluación de la integral de línea resultante de aplicar el teorema de Green a (19); así:

$$J_z = \text{lo}(i,j) \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha z/3} & \frac{j}{\alpha z/6} & 0 \\ \frac{1}{\alpha z/6} & \frac{j}{\alpha z/3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_m^i \\ C_m^j \\ C_m^k \\ C_m^l \end{bmatrix} - \text{lo}(i,j) \begin{bmatrix} \frac{j}{\alpha z} C^*/2 \\ \frac{j}{\alpha z} C^*/2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

lo que en términos matriciales se puede expresar como:

$$J_z = M_z \cdot C_m - L_z \quad (29)$$

donde $\text{lo}(i,j)$ es la longitud del lado (i,j) del elemento e .

La incorporación de J_z en su forma matricial a la expresión (27), modifica las expresiones (26a) y (26d), dejándolas como se presenta a continuación:

$$A' = \frac{A \cdot \theta_m}{\tau} + B + C \cdot E - M_z \quad (30)$$

$$d' = \frac{1}{\tau} \left[A \theta_m \cdot C_m^{t-1} + D S_m^{t-1} \right] - C \cdot G - L_z \quad (31)$$

Todos los antecedentes vertidos en la formulación teórica del problema de transporte de un contaminante, se han utilizado en el desarrollo de un programa de computación (TRANNS) para ser utilizado en un PC compatible o en un computador de mayor tamaño. En la Figura 1 se muestra un diagrama de bloques en que se aprecian los diversos procesos del modelo TRANNS.

VALIDACION TEORICA

Para validar el modelo TRANNS, se comparó sus resultados con los provenientes del desarrollo de una solución teórica para casos de geometría simple.

El caso seleccionado corresponde a una columna semi infinita en cuyo borde superior se impone una concentración C^* conocida, y en su borde inferior ($z \rightarrow \infty$) una concentración nula. Dicha solución analítica considera un sistema unidimensional y la existencia de fases móvil e inmóvil del fluido en el medio poroso. La solución analítica se entrega a continuación:

$$C_m = \int_0^T \frac{\partial C_m}{\partial T}(X, \tau) \cdot J \left[\frac{\bar{\alpha} \tau}{\theta}, \frac{T - \tau}{1 - \theta} \right] d\tau \quad (32)$$

$$C_{im} = \int_0^T \frac{\partial C_m}{\partial T}(X, \tau) \cdot \left(1 - J \left[\frac{\bar{\alpha} \tau}{1 - \theta}, \frac{T - \tau}{\theta} \right] \right) d\tau \quad (33)$$

donde J es una función que aparece frecuentemente en problemas de transporte, y se define como:

$$J(a, b) = 1 - \exp(-b) \cdot \int_0^a \exp(-u) \cdot I_0(2\sqrt{bu}) du \quad (34)$$

en que I_0 es una función de Bessel modificada de orden cero. La expresión que representa al término $\partial C_m / \partial T$ es:

$$\frac{\partial C_m}{\partial T} = C_0 \frac{X - \theta}{2T} \left[\frac{P}{\alpha T - \theta} \right]^{1/2} \cdot \exp \left[-\frac{P(X - T/\theta)^2}{4T/\theta} \right] \quad (35)$$

En las expresiones (32) a (35) las variables X , T , θ , P y α

corresponden a términos adimensionales en función de las variables originales, cuya definición es: $X = x/L$, $T = qt/\theta/L$, $\theta = \theta_a/\theta$, $\alpha = \alpha d \cdot L/q$; en que L es una longitud característica.

Para la validación se consideró los siguientes valores para los parámetros adimensionales: $\theta = 0.8$, $P = 20$ y $\alpha = 1.0$. El modelo de simulación TRANNS fue aplicado imponiendo las condiciones de borde especificadas, utilizando intervalos de tiempo $\tau = 0.2500$, $\tau = 0.0500$, $\tau = 0.0250$ y $\tau = 0.0125$. Los resultados que se han obtenido luego de aplicar el modelo TRANNS pueden ser consultados en los Cuadros 1 a 4, en los cuales se incluye además el valor resultante de la solución teórica.

En las Figuras 2 y 3 se observa la comparación, para $T = 0.25$ y $T = 0.75$, de los resultados de la aplicación del modelo TRANNS y la solución teórica correspondiente. En cada caso, fase inmóvil y móvil, se observa una correcta reproducción de los resultados, siendo en el caso de tiempo menor, $T = 0.25$, mejor el ajuste logrado; una explicación a esto sería que al introducirse errores, estos se van acumulando como resultado de la aplicación sucesiva de la aproximación de la derivada temporal mediante el enfoque implícito o de diferencias hacia atrás.

CONCLUSIONES

Del desarrollo del presente trabajo es posible obtener las siguientes conclusiones de tipo general:

- La validación teórica que se ha realizado permite asegurar un correcto funcionamiento del modelo en términos de una buena reproducibilidad de los valores analíticos.
- El intervalo de simulación utilizado juega un rol importante debido a los errores que se introducen en la linealización mediante el esquema implícito. Este hecho ya fue advertido en un trabajo anterior (Cabrera y Espinoza, 1969), en el cual, durante la aplicación de un modelo de simulación del flujo existían problemas similares.
- El acoplamiento de un modelo de simulación del flujo y uno de transporte de un elemento contaminante es necesario, atendiendo al hecho que los términos de velocidad y humedad, juegan un rol muy importante en este último proceso. En la validación teórica del presente modelo no fue utilizado esto, debido a que la solución únicamente consideraba un campo de

velocidades y humedades constante.

El uso de esta metodología, en casos reales de rastreo de un contaminante en un medio poroso no saturado, ha dado resultados aceptables, confirmando que la modelación de los diversos procesos es la adecuada. En la actualidad esta investigación está derivando hacia el estudio del problema de inestabilidades que ocurren en la solución de problemas similares al planteado, debido fundamentalmente al tipo de ecuación diferencial que modela el fenómeno.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AC ING (1989). "Estudio de Dispersión de Contaminantes en el Centro Nuclear de Lo Aguirre".
- BEAR J. y A. VERRULJT (1987). Modeling Groundwater Flow and Pollution. RAEDEL.
- CABRERA G. y S. AZZARI (1979). "Modelo de Elementos Finitos para Simular el Comportamiento de Sistemas de Aguas Subterráneas. Aplicación al Caso de la Cuenca del Río Putaendo". Anales IV Coloquio Nacional de Ingeniería Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Valparaíso. Vol 2, pp. 441-459.
- CABRERA G. y C. ESPINOZA (1989). "Dispersión de Contaminantes en un Medio Poroso no Saturado. I. Modelo de Simulación del Flujo". IX Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Santiago.

CUADRO 1 : Concentración Fase Móvil T = 0.25

L	S.A.	EF(1)	EF(2)	EF(3)	EF(4)
0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.1	0.918	0.730	0.884	0.902	0.910
0.2	0.785	0.533	0.697	0.730	0.748
0.3	0.589	0.389	0.491	0.518	0.534
0.4	0.322	0.284	0.313	0.320	0.325
0.5	0.149	0.207	0.184	0.174	0.167
0.6	0.053	0.151	0.102	0.094	0.072
0.7	0.014	0.110	0.053	0.037	0.027
0.8	0.003	0.080	0.027	0.015	0.009
0.9	0.000	0.059	0.013	0.006	0.002
1.0	0.000	0.043	0.006	0.002	0.001

CUADRO 3 : Concentración Fase Móvil T = 0.75

L	S.A.	EF(1)	EF(2)	EF(3)	EF(4)
0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.1	0.994	0.971	0.989	0.991	0.991
0.2	0.981	0.922	0.968	0.972	0.974
0.3	0.958	0.855	0.932	0.940	0.943
0.4	0.922	0.777	0.891	0.891	0.897
0.5	0.869	0.692	0.806	0.823	0.832
0.6	0.796	0.607	0.717	0.737	0.748
0.7	0.702	0.525	0.617	0.637	0.647
0.8	0.591	0.449	0.513	0.527	0.536
0.9	0.470	0.379	0.410	0.418	0.423
1.0	0.352	0.318	0.317	0.317	0.317

CUADRO 2 : Concentración Fase Inmóvil T = 0.25

L	S.A.	EF(1)	EF(2)	EF(3)	EF(4)
0.0					
0.1	0.636	0.556	0.672	0.692	0.702
0.2	0.354	0.405	0.495	0.513	0.523
0.3	0.199	0.296	0.333	0.340	0.344
0.4	0.092	0.216	0.206	0.200	0.197
0.5	0.034	0.158	0.119	0.106	0.097
0.6	0.010	0.115	0.064	0.050	0.042
0.7	0.002	0.061	0.033	0.022	0.015
0.8	0.000	0.045	0.017	0.009	0.005
0.9	0.000	0.033	0.008	0.003	0.001
1.0	0.000	0.024	0.002	0.000	0.000

CUADRO 4 : Concentración Fase Inmóvil T = 0.75

L	S.A.	EF(1)	EF(2)	EF(3)	EF(4)
0.0					
0.1	0.948	0.912	0.965	0.971	0.974
0.2	0.905	0.847	0.925	0.935	0.940
0.3	0.848	0.771	0.868	0.882	0.889
0.4	0.775	0.699	0.795	0.812	0.821
0.5	0.687	0.606	0.707	0.725	0.735
0.6	0.588	0.526	0.610	0.627	0.636
0.7	0.482	0.450	0.509	0.521	0.529
0.8	0.377	0.381	0.410	0.417	0.420
0.9	0.279	0.320	0.320	0.319	0.319
1.0	0.194	0.220	0.176	0.234	0.230

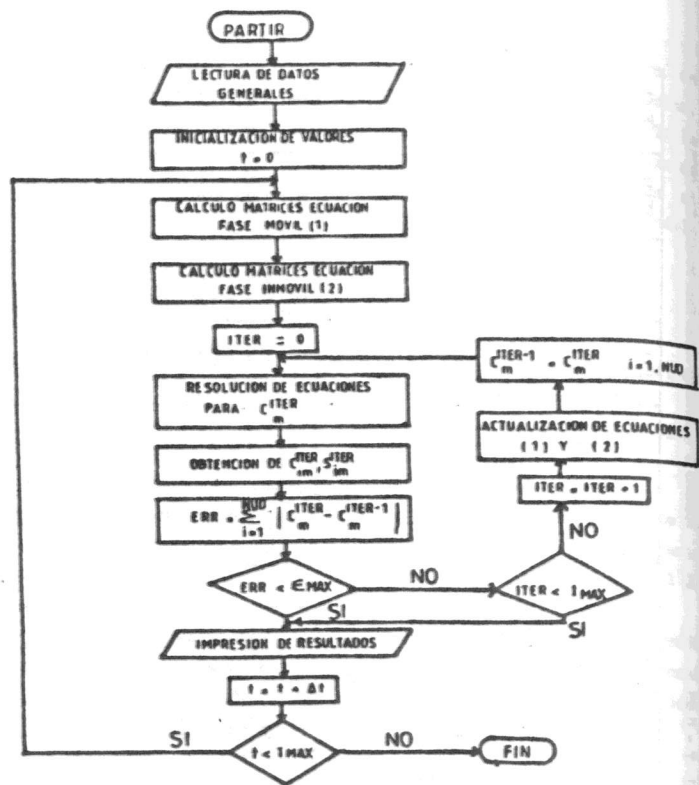


FIGURA 1. DIAGRAMA DE BLOQUES MODELO TRANNS

SIMBOLOGIA

- ITER = N° ITERACION
- I_MAX = N° MAXIMO DE ITERACIONES
- E_MAX = ERROR ADMISIBLE
- t = PERIODO SIMULADO
- dt = INCREMENTO DEL TIEMPO
- T_MAX = TIEMPO MAXIMO DE SIMULACION
- i = NUDO
- C_m = CONCENTRACION FASE MOVIL
- C_im = CONCENTRACION FASE INMOVIL
- S_im = CONCENTRACION ADSORBIDA DESDE FASE INMOVIL

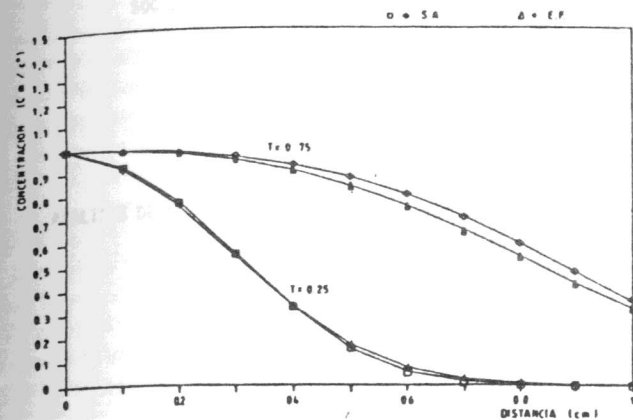


FIGURA 2. CONCENTRACION FASE MOVIL
CONCENTRACION vs DISTANCIA

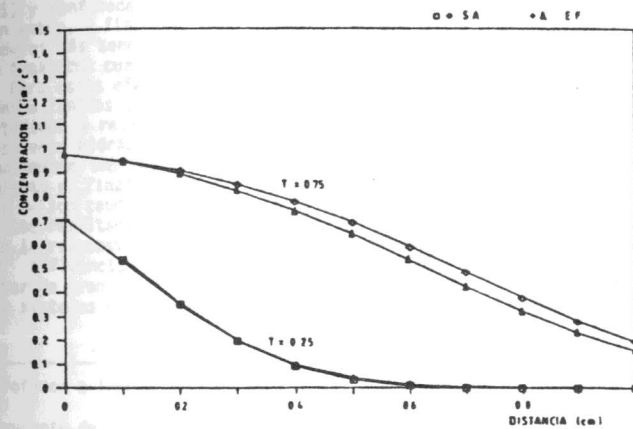


FIGURA 3. CONCENTRACION FASE INMOVIL
CONCENTRACION vs DISTANCIA