

REPO-16

CNEA-NT 44/85.

ASPECTOS NUMERICOS DEL MODELADO DE  
LOS EFECTOS LOCALES DE UN REPOSITORIO  
DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD

Ferreri, J.C.\*; Ventura, M.

REPUBLICA ARGENTINA  
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
Dependiente de la Presidencia de la Nación  
GERENCIA DE PROTECCION RADIOLOGICA Y SEGURIDAD\*

REPO-16

CNEA-NT 44/85

ASPECTOS NUMERICOS DEL MODELADO DE  
LOS EFECTOS LOCALES DE UN REPOSITORIO  
DE RESIDUOS RADIOACTIVOS DE ALTA ACTIVIDAD

Ferreri, J.C.\*; Ventura, M.

\* Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET

Este trabajo fue presentado en la "XII Reunión Científica y III° Encuentro Latinoamericano" organizados por la AATN en Buenos Aires, entre el 6 y el 10 de diciembre de 1984.

\* Casilla de Correo 40  
1802 AEROPUERTO DE EZEIZA, Argentina

Buenos Aires  
1985

INIS CLASSIFICATION AND KEYWORDS

E52.00

COMPUTERIZED SIMULATION  
GROUNDWATER FLOW (\*)  
HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTES  
RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL  
RADIONUCLIDE MIGRATION  
REPOSITORIES (\*)  
THERMAL CONDUCTION  
UNDERGROUND DISPOSAL

(\*) Not shown in INIS Thesaurus 1985.

ASPECTOS NUMERICOS DEL MODELAO DE LOS EFECTOS LOCALES  
DE UN REPOSITORIO DE RESIDUOS RADIOACTIVOS DE ALTA ACTIVIDAD

por J. C. Ferreri\* y M. Ventura\*

CNEA, Gerencia Protección Radiológica y Seguridad,  
Av. del Libertador 8250, 1429, Capital Federal, Argentina

RESUMEN

Se discuten las aproximaciones numéricas adoptadas para el desarrollo de los modelos computacionales para la predicción de los efectos locales de un repositorio de residuos radioactivos de alta actividad. Los problemas considerados son: la historia térmica del medio rocoso, el flujo de agua subterránea y la migración de radionucleidos.

Se presentan resultados de verificación de las metodologías desarrolladas y se discuten sus limitaciones y ventajas.

1. INTRODUCCION

El modelado numérico del comportamiento de los diversos "componentes" de un repositorio<sup>+</sup> implica considerar problemas simultáneos de transferencia de calor y materia y de flujo de fluidos en sistemas de escalas temporales y espaciales de orden dispar. Ello es claro, con respecto a las escalas espaciales a partir de la figura 1, que muestra, en sucesivas ampliaciones, la aparición de componentes del sistema global ("el repositorio", figura 1a) de escala cada vez menor. Es obvio que el último componente (el contenedor, figura 1c) tiene escalas que harían impracticable su análisis detallado con un modelo que permitiera un análisis del sistema global. Por otra parte, este último almacenaría un número de contenedores del orden de 3000. La escala temporal es también dispar, pues varía desde las decenas de años para el contenedor hasta los  $10^5$  -  $10^6$  años para el macizo rocoso y la dispersión de contaminantes. A su vez, el macizo rocoso presenta perturbaciones (macrofracturas) que aparecen como "singularidades" en un medio fracturado relativamente homogéneo

---

\* Miembros de la Carrera del Investigador del Conicet, ARGENTINA.

+ Cuando mencionamos "un repositorio" lo hacemos con referencia, por brevedad, a una configuración típica de un sistema para la disposición final de residuos radiactivos de alta actividad en un macizo rocoso, encuadrada en la filosofía del proyecto argentino. Mantendremos, además, un significado vago para "componentes" que aclararemos en cada caso.

Lo anteriormente expuesto lleva a la necesidad de considerar modelos particulares para cada componente de un repositorio y es el objetivo de este trabajo discutir los aspectos numéricos y computacionales de aquellos desarrollados hasta la fecha. Daremos algunos detalles relacionados con la transmisión de calor, el flujo de agua y la migración de radionucleidos, especificando las referencias más detalladas en cada caso.

## 2. ASPECTOS NUMERICOS ASOCIADOS CON LA CONDUCCION DEL CALOR

Nos referiremos a las técnicas empleadas para predecir la distribución de temperatura en el macizo, considerando la escala del sistema global y siendo el repositorio un componente macroscópico. Hay diversas formas de analizar el impacto térmico local; la más obvia es considerar un gran número de nodos que, para un caso en tres dimensiones (3D), puede estar en el orden de  $10^4$ . Cuando debe considerarse, además, el problema del flujo de agua, es razonable abandonar esta idea por el tiempo de cómputo excesivo que implicaría (al menos con nuestro computador).

Los análisis bidimensionales (2D) no siempre dan la información necesaria y por ello se emprendió el desarrollo de una técnica adecuada en 3D. Esta técnica está basada en considerar que las fuentes de calor son "singularidades" que generan una distribución de temperatura obtenible en forma analítica. Los resultados quedan restringidos al caso en el que los parámetros de la roca no dependen fuertemente de la temperatura, lo cual es una razonable aproximación. Ferreri y Ventura<sup>1</sup> muestran resultados de calibración de esta metodología basada en diferencias finitas y dan los detalles de la técnica numérica. La figura 2 ilustra lo dicho para el caso de una fuente puntual constante, utilizando una red de 10 puntos ubicados en  $r = 5, 15, 30, 60, 130, 200, 350, 500, 750$  y  $1000$  m y muestra los parámetros de transporte y la intensidad de la fuente.

El decaimiento de los residuos radioactivos produce una generación de calor variable en el tiempo que es aproximable en la forma<sup>2</sup>:

$$Q = Q_0 \quad A_1 e^{-\lambda_1 t} + A_2 e^{-\lambda_2 t} \quad ,$$

con:  $A_1 = 0.882 \quad , \quad A_2 = 0.118$

$$\lambda_1 = 2.31 \cdot 10^{-2} \text{ año}^{-1}, \quad \lambda_2 = 1.386 \cdot 10^{-3} \text{ año}^{-1} \quad ,$$

Para el caso de los residuos del plan nuclear argentino, un análisis detallado<sup>3</sup> permitió verificar que:

$$A_1 = 0.901 \quad , \quad A_2 = 0.099$$

$$\lambda_1 = 2.373 \cdot 10^{-2} \text{ año}^{-1} \quad \lambda_2 = 1.61 \cdot 10^{-3} \text{ año}^{-1}$$

Estos valores son similares a los anteriores, lo que es importante pues esta similitud permitirá extrapolar confiadamente los resultados que se muestran a continuación. La figura 3 compara los resultados obtenidos mediante la técnica del trabajo de Ferreri y Ventura<sup>1</sup> con otros previos de Ratigan<sup>2</sup>, y la relación a un caso con solución analítica conocida y grillas similares.

Para el caso de la planta completa del repositorio, Ferreri y Caballero<sup>4</sup> generaron resultados para una fuente plana finita de planta rectangular y

decaimiento del tipo visto. Con esa base y empleando una red de  $8 \times 8 \times 20$  nodos según  $x$ ,  $y$ ,  $z$  y  $\Delta t = 0.5$  año, se obtuvieron los resultados mostrados en las figuras 4 y 5, para  $Q_0 = 5.20 \text{ W/m}^2$ .

En el trabajo de Ferreri y Ventura<sup>1</sup> se pueden encontrar comparaciones con resultados previos de estos autores y discusiones adicionales.

### 3. ASPECTOS NUMERICOS ASOCIADOS CON EL FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA

Consideramos aquí el cómputo del flujo de agua en un medio rocoso que es modificado en su estado térmico por la presencia de fuentes de calor. Un medio rocoso puede ser considerado como un medio poroso equivalente o como un medio fracturado. El tratamiento es diferente en cada caso siendo, naturalmente, más aproximado el segundo. Aquí mencionaremos sólo las aproximaciones adoptadas y algunos aspectos computacionales.

La primera aproximación consiste en considerar el flujo unidimensional (1D) en una fractura individual en el seno de la roca. Este análisis fue efectuado para obtener comparaciones con soluciones analíticas simples<sup>6</sup> y generar resultados rápidos de interés práctico. El programa desarrollado permite considerar caminos arbitrarios, de área y permeabilidad conocidas, en conjunto con una fuente de calor variable en el tiempo pero no acoplada con el flujo de agua en la fractura. Para las ecuaciones de movimiento se considera la validez de la "ley" de Darcy y un fluido esencialmente incompresible, con variaciones de la densidad basadas en una aproximación de Boussinesq.

La figura 6 muestra una celda típica del camino 1D de integración con la ubicación de las variables y una configuración particular del camino. Dicha configuración fue elegida para comparar resultados con los de Wang et al.<sup>6</sup>. En la misma figura 6 se muestra la comparación de resultados para  $L = D = 500 \text{ m}$ , la permeabilidad de la fractura  $k = 1.7 \times 10^{-9} \text{ m}^2$  y con los parámetros del agua evaluados a  $20^\circ\text{C}$ . Este ejemplo sirve para mostrar la sensibilidad de los resultados a la discretización y, como puede verse en dicha figura, obtenida para variaciones de densidad generadas por el gradiente geotérmico, los resultados son aceptables para 100 celdas (con  $\Delta t = 0.5$  año). Como el programa admite una entrada arbitraria de datos del camino, es posible emplearlo en casos de interés práctico (por ejemplo, para analizar el flujo en una fractura alejada del repositorio, que es un caso de obvio interés).

La aproximación más interesante es, naturalmente, la que considera el flujo en varias dimensiones. Como es de interés considerar zonas de geometría arbitraria, se optó por utilizar como base para los cálculos el método desarrollado por Martínez y Ferreri<sup>7</sup>, consecuentemente adoptado para considerar el flujo no estacionario bajo las aproximaciones de Darcy y Boussinesq. La citada metodología considera transformaciones discretas de coordenadas que permiten ajustar la red de nodos de cálculo a la geometría del recinto de integración. En este caso particular de aplicación, el interés reside en ubicar los nodos en forma adecuada en zonas particulares del recinto, ya sea sobre fracturas para reflejar cambios de permeabilidad, sobre zonas de fuerte variación de los parámetros, etc.,.

Los detalles algebraicos<sup>8</sup> son demasiado extensos para ser considerados aquí, donde sólo mostraremos los resultados obtenidos para un caso bidimensional, bajo la aproximación de un medio poroso equivalente a uno fracturado uniformemente con fracturas de  $10 \mu\text{m}$  de espesor, separadas  $0.1\text{m}$ . Esta distribución,

considerada como ejemplo, implica una porosidad  $\phi = 0.3 \times 10^{-3}$ , una permeabilidad  $k = 1.7 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  y una conductividad hidráulica  $\Gamma = 0.25 \times 10^{-7} \text{ m/seg}$ . Los valores indicados, en conjunto con una fuente de  $5.25 \text{ W/m}^2$  y con un decaimiento temporal del tipo visto en el apartado 1, fueron empleados con una red de nodos variable en las cercanías de la fuente de calor de  $13 \times 13$  nodos para el caso 2D. Las condiciones de borde fueron continuativas y el recinto abarcaba desde la superficie hasta una profundidad  $D = 2000 \text{ m}$ . Hacia los costados el recinto abarcaba  $750 \text{ m}$  hacia cada lado del eje  $z$ . La fuente de calor fue considerada independiente del flujo del agua, de acuerdo a lo ya visto antes. El intervalo de tiempo de integración era  $\Delta t = 1 \text{ año}$ .

Las figuras 7 a - b muestran los resultados obtenidos para 100 y 1000 años respectivamente, e indican como cambia la configuración del flujo cuando comienza a difundirse el calor en zonas cada vez más importantes del macizo rocoso. La velocidad máxima del flujo es del orden de  $1 \times 10^{-10} \text{ m/seg}$  y tiende a disminuir cuando pasa el tiempo.

En su versión actual el programa considera permeabilidad uniforme, pero su extensión para considerar su variación es simple.

#### 4. ASPECTOS NUMERICOS ASOCIADOS CON LA MIGRACION DE RADIONUCLEIDOS

Este problema está ligado, naturalmente, al considerado en el apartado anterior. Sin embargo, se optó por desarrollar un programa para la predicción de la difusión y el decaimiento de las cadenas de nucleidos en forma independiente. Esto permitió verificar el efecto de los parámetros físicos (o el número de Peclet) y de la nodalización sobre los resultados. Sólo se consideraron cadenas de hasta tres componentes, permitiendo el programa un número arbitrario de éstos.

En este trabajo mostraremos algunos resultados de calibración, refiriendo al lector al informe de Ventura<sup>9</sup> para los estudios detallados.

Una fuente interesante para la comparación de resultados es la referencia 10, la cual indica los méritos relativos de veinte programas para la predicción de la migración 1D de cadenas de radionucleidos. La figura 8 muestra la concentración de  $U_{234}$  a la salida del camino de integración ( $L = 500 \text{ m}$ ), obtenida con 20 puntos para el camino de integración (una discretización coherente con lo visto hasta ahora),  $U = 0.3 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ,  $Pe = 50$  y  $\Delta t = 10 \text{ años}$ . Como puede verse la comparación es razonable. El número de Peclet bajo permite emplear aproximaciones centradas, pero esta situación podría cambiar si se consideran otros nucleidos. En este caso se emplearían aproximaciones no centradas para evitar oscilaciones en el frente de migración.

#### 5. DISCUSION Y CONCLUSIONES

Se han mostrado resultados obtenidos para varios de los componentes del repositorio en casos similares a los esperables en el modelado de un sistema real. Dichos resultados han mostrado que es posible obtener una excelente aproximación, utilizando un bajo número de nodos, cuando se emplean técnicas que tienen en cuenta las abruptas variaciones de las variables de interés. En el caso de la conducción de calor en el medio rocoso, se vio que era posible reproducir casos de calibración con un bajo número de nodos que, para el caso 3D, era del orden de 1500. Cuando la escala de análisis disminuye a la de los

componentes menores, como es el caso del contenedor, debería abandonarse este tipo de técnicas para considerar las convencionales.

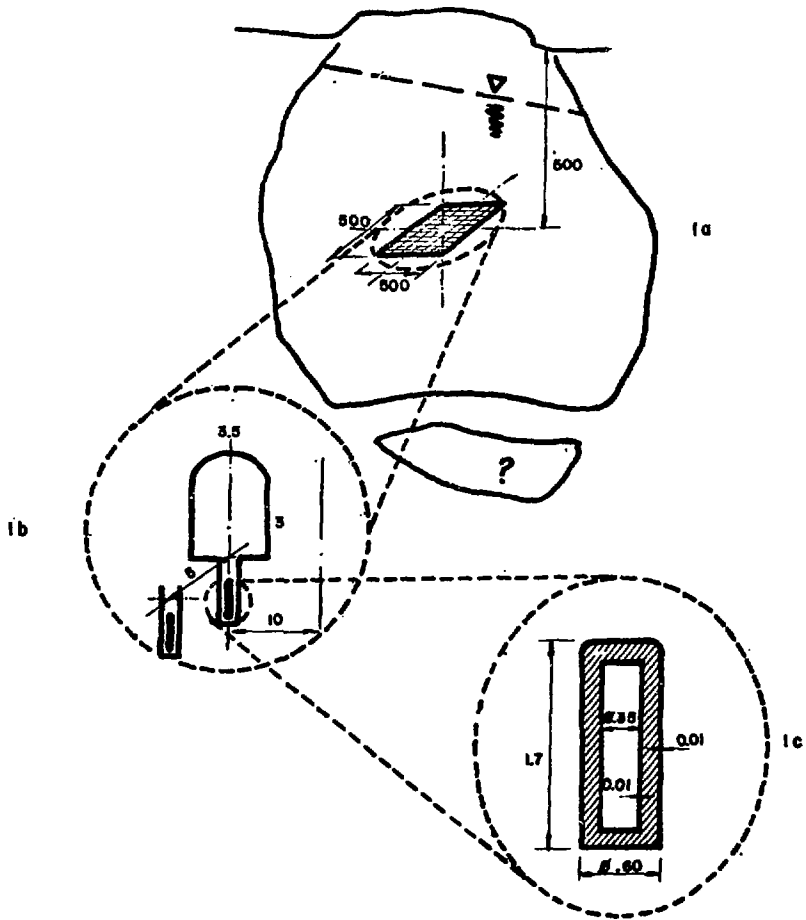
El efecto combinado del calor y la porosidad del medio provoca la circulación del agua, la que, a su vez, afectará la permanencia de los productos disueltos en el medio rocoso. Como la predicción a escala local implica la consideración de escalas diversas, es importante mantener la técnica considerada para la transmisión del calor, ahora en combinación con las ecuaciones de movimiento del fluido. Se mostró que para este problema es posible obtener resultados de interés basados en modelos 1D y 2D. El número de celdas es bajo si se considera la técnica ya mencionada. Estos resultados no podrían obtenerse en la manera convencional, mediante diferencias finitas.

El caso de la migración de los radionucleidos no ofrece, al menos en el rango analizado, dificultades mayores para los casos 1D. Es razonable esperar esto también en los casos 2D.



REFERENCIAS

- 1 Ferreri, J.C. y Ventura, M.A. "Aspectos numéricos del estudio del impacto térmico regional de un repositorio de residuos radioactivos". A publicarse en Nucl. Eng. Des., 1985.
- 2 Ratigan, J.L. "Ground water movements around a repository". Stockholm, Kaernbraenslesaeckerhet, 1977. KBS-TR-54-02. 78 p.
- 3 Pardo, O. Comunicación privada. CNEA, Gerencia Protección Radiológica y Seguridad, 1984.
- 4 Ferreri, J.C. y Caballero, H. "Difusión de calor a partir de una fuente plana rectangular finita". A publicarse en Rev. Lat. Transferencia de Calor y Materia.
- 5 Ventura, M. y Ferreri, J. C. "Evolución temporal de un macizo granítico bajo cargas térmicas generadas por productos de fisión". Buenos Aires, CNEA-Gerencia de Protección Radiológica y Seguridad, 1982. REPO-4.
- 6 Wang, J.S.Y. y otros. "A study of regional temperature and thermohydrologic effects of an underground repository for nuclear wastes in hard rock". J. Geophys. Res. vol. 86: 3759 -3770, n° B 5, 1981.
- 7 Martínez, B. and Ferreri, J.C., "SOLA-BFC A computer code for unsteady fluid flow calculations with boundary-fitted coordinates", Annals of the III Congreso Latinoamericano sobre Métodos Computacionales en Ingeniería, A. Ferrante (ed.), Buenos Aires, pp. 614-630, 1982.
- 8 Ferreri, J.C. "Models for the study of local effects produced by a high level waste repository". CNEA, Gerencia Protección Radiológica y Seguridad. En preparación.
- 9 Ventura, M.A. "Predicción de la migración de radionucleidos". CNEA, Gerencia Protección Radiológica y Seguridad. En preparación.
- 10 Larsson, A. H. y otros. "Mathematical models for nuclide transport in geologic media; an international intercomparison (INTRACOIN)". International Conference on Radioactive Waste Management. Seattle, may 16-20, 1983. Proceedings Series. STI/PUB/649. vol. 5: 197-211.



FUERA DE ESCALA  
 DIMENSIONES EN (m)

FIG. 1 - Ilustración de las diversas escalas espaciales del sistema

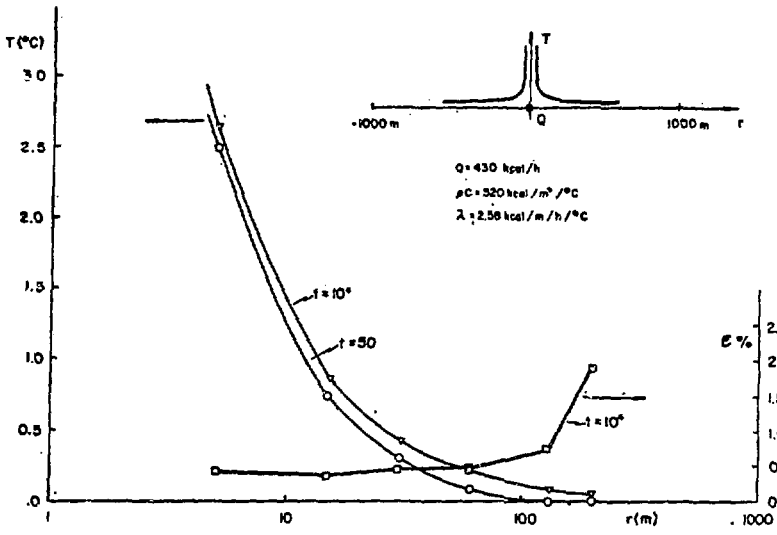


FIG. 2 - Comparación de resultados entre la técnica de Ferreri y Ventura<sup>1</sup> y la solución analítica para una fuente puntual constante,  $\Delta t = 0.5$  año.

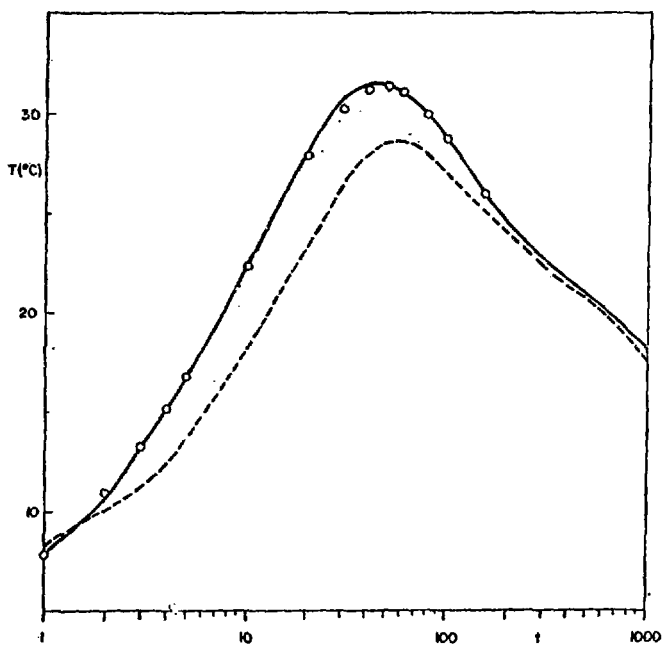


FIG. 3 - Comparación de resultados para el caso de una fuente plana infinita Presentes<sup>1</sup>, - - - Ratigan<sup>2</sup>, ——— analíticos.  $\Delta t = 0.5$  año.

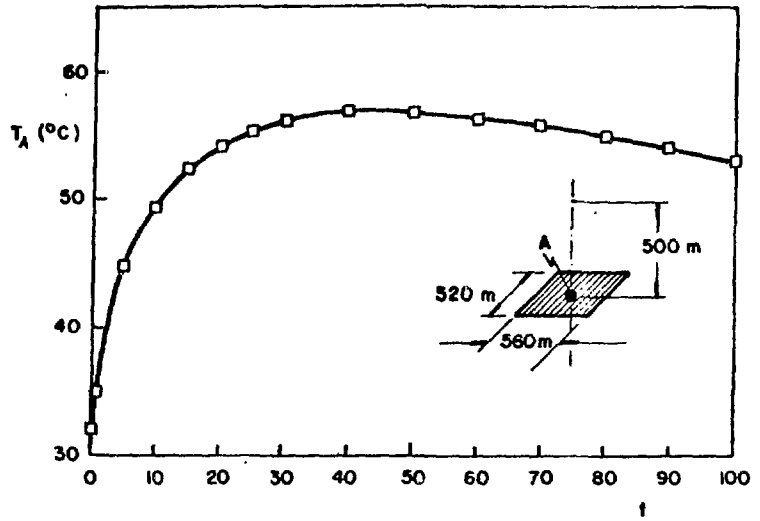


FIG. 4 - Evolución temporal de la temperatura en el centro del repositorio.

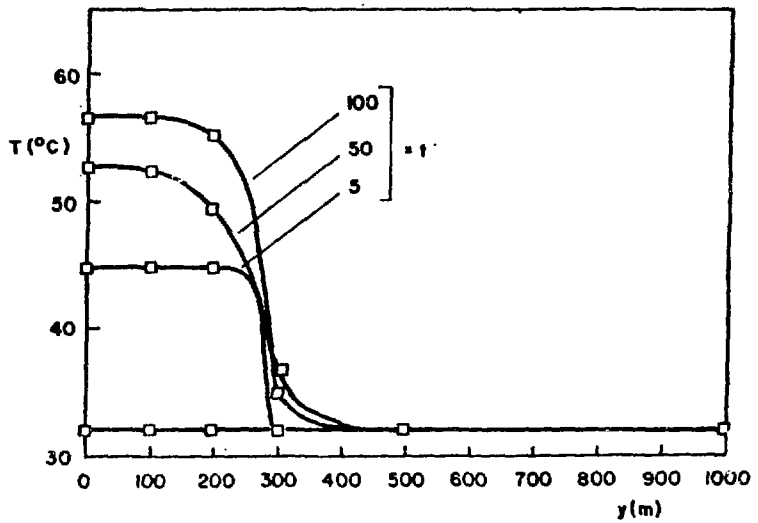


FIG. 5 - Evolución temporal de la temperatura en el eje y.

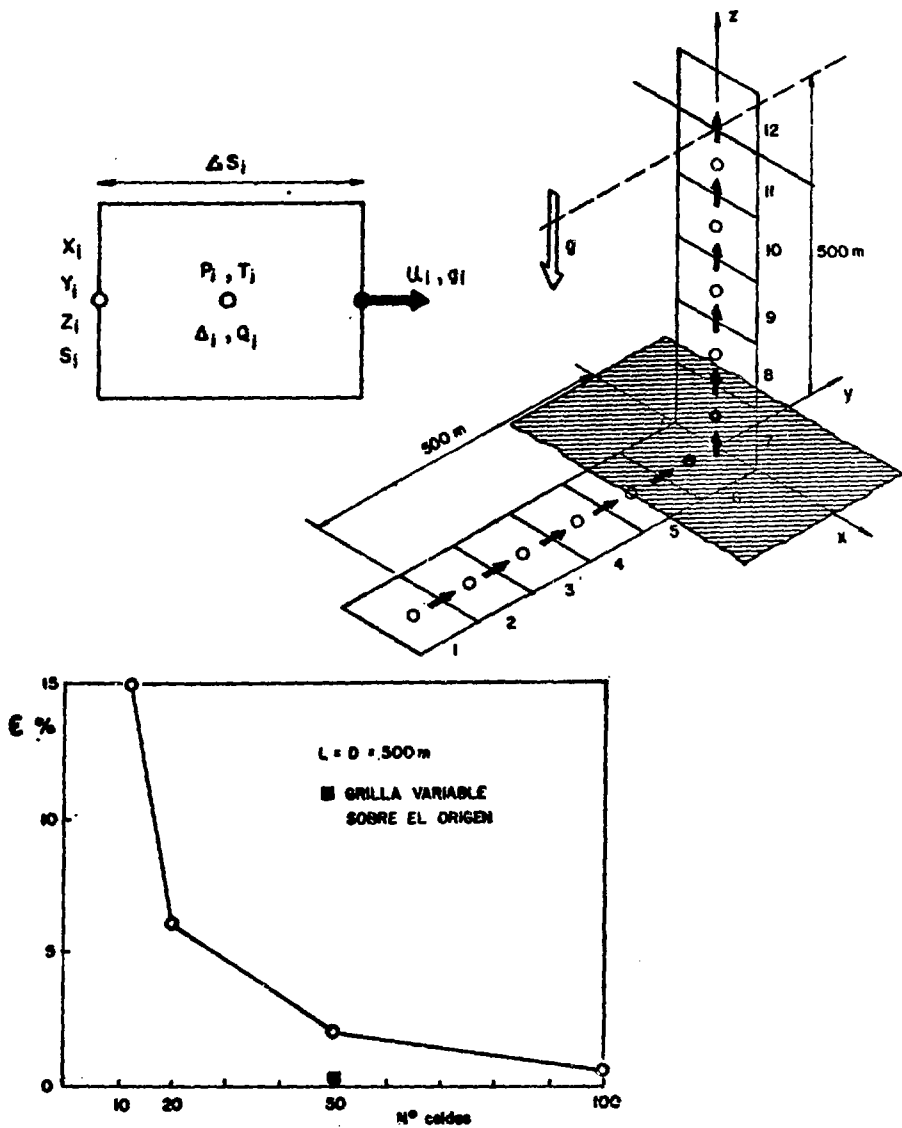


FIG. 6 - Comparación de resultados obtenidos para el caso 1D con la solución analítica.  $\Delta t = 0.5$  año.

t = 100 años

t = 1000 años.

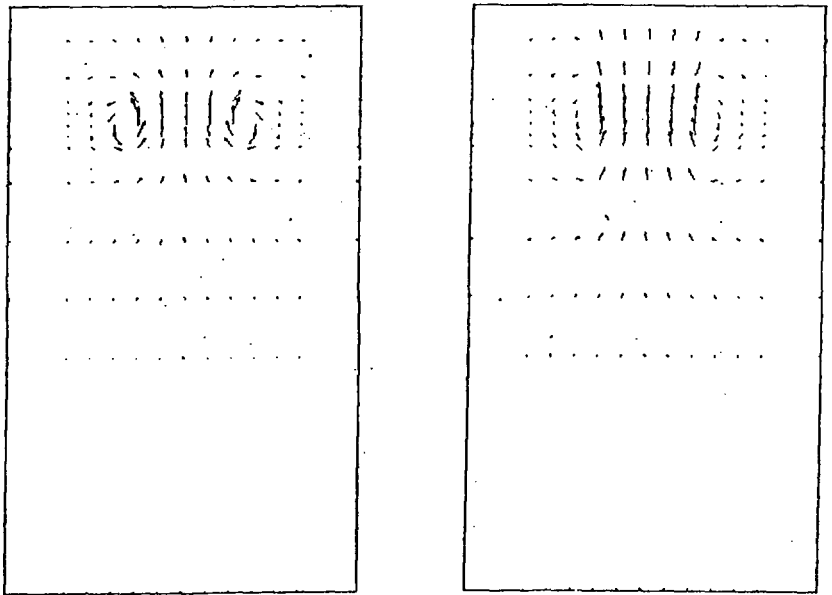
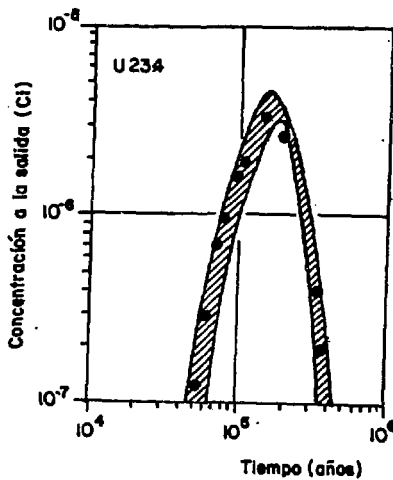


FIG. 7 Distribución de velocidad en el medio rocoso



CURVE NO.	CODE	BC
1	SWENT	E3B2
2	SWENT	E1B2
3	TRANSAT	E1B1
4	TRANSAT	E1B2
5	TRANSAT	E3B1
6	UCB-NE	E1B1
7	UCB-NE	E1B2
8	SWIFT	E1B2
9	GETOUTO	E1B1
10	RANCH	E1B1
11	RANCH	E1B2
12	TRUCHN	E1B1
13	MHT1DPNL	E3B2
14	MHT1DPNL	E3B1
15	GEOS	E1B2
16	GETOUTV	E1B1
17	MHTVTT	E1B1
18	TROUGH	E1B1
19	COLUMN	E3B1
20	DRAMA	E2B2

● PRESENTE E3B1

FIG. 8 - Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN<sup>10</sup>.  
 $Pe = 50$ , 20 nodos,  $\Delta t = 10$  años.

- REP01 - Beninson, D.; Migliori de Beninson, A.  
"Radiological impact of radioactive waste management"
- REP02 - Lucero Michaut, H.  
"Aplicación de la geoestadística a la resolución de problemas estructurales en macizos rocosos homogéneos"
- REP03 - Ventura, M.; Ferreri, J.C.  
"Evolución temporal de un macizo granítico bajo cargas térmicas generadas por productos de fisión"
- REP04 - Ventura, M.; Ferreri, J.C.  
"Evolución temporal de un macizo granítico bajo cargas térmicas generadas por productos de fisión (estudio paramétrico)"
- REP05 - Beninson, D.  
"Radioactive emissions and radiation exposures resulting from nuclear power production"
- REP06 - Beninson, D.; Lindell, B.  
"Application of ICRP recommendations to radioactive waste isolation"
- REP07 - Migliori de Beninson, A.; Cancio, D.  
"Impacto radiológico de la gestión de residuos radiactivos del Programa Nuclear Argentino"
- REP08 - Migliori de Beninson, A.; Palacios, E.  
"Política en materia de gestión de desechos y su aplicación en Argentina"
- REP09 - Palacios, E. y otros.  
"Bases conceptuales para la construcción de un repositorio en la Argentina"
- REP010- Palacios, E. y otros.  
"Estudios para la selección del emplazamiento de un repositorio en Argentina"
- REP011- Matar, J.A.; Girardi, J.P.; Sarquis, M.A. M. de  
"Aplicación de técnicas geoestadísticas al estudio de una formación granítica destinada a la construcción de un repositorio"
- REP012- Ferreri, J.C.; VENTURA, M.  
"Numerical aspects of the study of the regional thermal impact of a radioactive waste repository"
- REP013- Ferreri, J.C.; Caballero, C.H.  
"Difusión de calor a partir de una fuente plana rectangular finita"
- REP014- Beninson, D.; González, A.J.  
"Radiological protection criteria for radioactive waste repositories"
- REP015- Palacios, E.; Ferreri, J.C.  
"Marco conceptual para el desarrollo de los modelos de predicción de los efectos locales de un repositorio de residuos radiactivos de alta actividad"
- REP016- Ferreri, J.C.; Ventura, M.  
"Aspectos numéricos del modelado de los efectos locales de un repositorio de residuos radiactivos de alta actividad"
- REP017- Beninson, D.  
"Criterios de radioprotección en el caso de eventos disruptivos probabilísticos"
- REP018- Ferreri, J.C.; Grandi, G.  
"Models for the study of the local effects produced by a high-level radioactive waste repository"

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
Gerencia Protección Radiológica y Seguridad

	Domicilio Postal Postal Address	Télex	Facsimil	Teléfono
Sede Central (Main Headquarters)	Av. Libertador 8250 1429 - Buenos Aires Argentina	21388 PREAT AR	701 - 2431 (int. 248) (ext.	701 - 2431
Centro Atómico Ezeiza Ezeiza Atomic Center	Casilla de Correo 40 1802 - Aeropuerto Ezeiza Argentina	18079 CAE AR	620 - 0480	620 - 0160