



GERENCIA DE PROTECCION RADIOLOGICA
Y SEGURIDAD

REPO-32

CNEA-NT 28/87

PREDICCIÓN DE LA MIGRACION
DE RADIONUCLEIDOS
EN EL MEDIO ROCOSO
PARTE I

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº	AÑO
1	1987

Ventura*, Mirta



COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
BUENOS AIRES - ARGENTINA

1987

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

REPO-32

CNEA-NT 28/87

PREDICCION DE LA MIGRACION
DE RADIONUCLEIDOS
EN EL MEDIO ROCOSO
PARTE I

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº	AÑO
1	1987

Ventura*, Mirta

* Mienbro de la Carrera del Investigador del CONICET, Argentina.

BUENOS AIRES
1987

INIS CLASSIFICATION AND KEYWORDS

E52.00

CONTAINERS

GRANITES

GROUND WATER

HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTES

RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL

RADIONUCLIDE MIGRATION

REPOSITORIES (*)

ROCKS

UNDERGROUND DISPOSAL

(*) Not shown in INIS Thesaurus 1985.

PREDICCIÓN DE LA MIGRACIÓN DE RADIONUCLEIDOS EN UN MEDIO ROCOSO

Parte I

por Mirta VENTURA

RESUMEN

Se desarrolla un modelo para la predicción de la migración de radionucleidos en un medio rocoso.

Se analizan distintas técnicas numéricas asociadas a la resolución de las ecuaciones diferenciales que representan el problema.

Se presentan resultados de verificación de metodologías desarrolladas.

ABSTRACT

A model for the prediction of the migration of radionuclides in a granitic rock was developed.

Different numerical techniques associated with the resolution of the differential equations representing the problem were analysed.

Verification results of the developed methodologies are presented.

1. INTRODUCCION

El mecanismo más probable para la liberación de cantidades significativas de radionucleidos desde un repositorio de residuos radioactivos instalado en un macizo granítico hacia la biósfera ocurre cuando el agua toma contacto con los residuos pudiendo así migrar los radionucleidos contenidos.

Básicamente el modelo que se desarrolla presenta un contenedor depositado en la profundidad de un macizo rocoso.

Después de un cierto período de tiempo se supone que los radionucleidos emergen del contenedor a una velocidad constante y son transportados como

especies discretas en el agua. La migración está gobernada fundamentalmente por tres parámetros: la velocidad del agua, el coeficiente de difusión y la retención de los nucleidos, estos tres parámetros y una longitud característica definen el número de Peclet del problema.

No se ha incluido en este trabajo el análisis bibliográfico realizado, porque se consideró suficientemente amplio el estudio de intercomparación que se encuentra en /9/.

En lo que sigue analizaremos las ecuaciones y los parámetros de transporte, los distintos métodos numéricos utilizados para conocer la concentración de cada radionucleido a la salida del camino de integración y los resultados que se obtuvieron en el contexto de la verificación de los programas desarrollados.

2. PARAMETROS DE TRANSPORTE

2.1. DIFUSION

Al hablar de difusión nos referiremos al movimiento del radionucleido a través del medio poroso con respecto al fluido.

El coeficiente de difusión es definido por la ecuación que relaciona la concentración de un radionucleido al flujo de ese mismo radionucleido. /1/ /2/ /7/ /8/.

$$\bar{J} = (\bar{V} - \bar{D} \cdot \bar{\nabla}) \cdot (n \cdot c) \quad (1)$$

$\bar{J}$ = flujo del radionucleido (gr/m² . a)

$\bar{V}$ = velocidad hidráulica (m/a)

$\bar{D}$ = coeficiente de difusión.tensor (m²/a)

$\bar{\nabla}$ = operador gradiente (1/m)

n = porosidad

c = concentración de radionucleidos (gr/m³)

El coeficiente $\bar{D}$, determina la contribución del gradiente de concentración al flujo y el término $(\bar{D} \cdot \bar{\nabla})$ representa la velocidad del nucleido con respecto al fluido.

En este tipo de medio el coeficiente de difusión aparente es menor que el coeficiente de difusión intrínseco, dado que el camino real es incrementado proporcionalmente a la tortuosidad y al gradiente de la concentración a lo largo del poro. Con el tamaño del poro se observa un efecto decreciente del coeficiente de difusión.

Si existen fisuras en el macizo, se observará que a cierta distancia la concentración es mayor de lo que se suponía considerando un medio solamente poroso, ya que la totalidad de la masa de la roca no podrá intervenir en las reacciones de sorción.

El término sorción, es un término general para referirse a las reacciones que tienen lugar dentro de los poros o en las superficies de los sólidos.

Veremos como se modifica la ecuación de difusión para tener en cuenta los efectos de sorción.

Postulamos que los radionucleidos que migran están en equilibrio de sorción con el medio geológico. Esto quiere decir que la reacción por la cual la sustancia es sorbida sucede rápidamente comparado con el proceso de difusión.

En el caso que consideramos, la concentración S de la sustancia sorbida se puede considerar directamente proporcional a la concentración C de la sustancia libre para difundir, es decir

$$S = R \cdot C \quad (2)$$

Debido a la sorción la ecuación para la difusión debe ser modificada de la siguiente manera:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C - \frac{\partial S}{\partial t} \quad (3)$$

si el coeficiente de difusión es constante, como consideraremos desde ahora.

Introduciendo (2) en (3), obtenemos:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{R + 1} \nabla^2 C \quad (4)$$

Como se ve, la forma de la ecuación de difusión es la misma, salvo que el coeficiente de difusión se ha transformado en $\frac{D}{R + 1}$

El efecto de la reacción es luego el de hacer más lento el proceso de difusión y es descrito por un factor llamado de retención del que hablaremos en lo que sigue.

2.2. FACTOR DE RETENCION

El factor de retención, es una medida de la capacidad del medio poroso para disminuir por sorción el movimiento de un radionucleido particular, llevado por el fluido. Matemáticamente puede definirse como la relación de la velocidad del agua a la velocidad del radionucleido.

Para definir este parámetro se considera la ecuación de continuidad para un medio estacionario, sin sorción /3/

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} (n \cdot c) = 0 \quad (5)$$

si hay efectos de sorción por el medio poroso, la ecuación es

$$\bar{V} \cdot \bar{J} + \frac{\partial}{\partial t} (n \cdot c) + \frac{\partial}{\partial t} ((1 - n) \cdot N) = 0 \quad (6)$$

donde N es la concentración del radionucleido que fue sorbido en la fase sólida por unidad de volumen.

En lo que consideramos es aplicable la relación

$$N = K_d C \quad (7)$$

donde K_d es el coeficiente de distribución del medio donde los radionucleidos son llevados por el fluido.

Introduciendo (7) en (6) obtenemos

$$\bar{V} \cdot \bar{J} + R \frac{\partial}{\partial t} (n \cdot c) = 0 \quad (8)$$

$$\text{donde } R = \text{coeficiente de retención} = 1 + (1 - n) K_d/n \quad (9)$$

K_d y R son adimensionales. K_d es una medida de la reacción entre el radionucleido, el fluido y el medio y generalmente se lo determina experimentalmente.

Se considera que no hay interacción entre dos especies de radionucleidos, o sea que el coeficiente de retención de un radionucleido es independiente de la concentración de otro radionucleido que es transportado en el mismo fluido.

3. ECUACIONES DE TRANSPORTE Y APROXIMACIONES

Para este estudio, por simplicidad, hemos considerado el caso unidimensional.

Para un radionucleido, con constante de decaimiento λ la ecuación de continuidad (8) se transforma en

$$\bar{V} \cdot \bar{J} + R \frac{\partial}{\partial t} (n \cdot c) + \lambda n c = 0 \quad (10)$$

De la ecuación (1), podemos encontrar $\bar{V} \cdot \bar{J}$

$$\bar{V} \cdot \bar{J} = n v \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - n D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (11)$$

y reemplazando en (10), obtenemos

$$n v \frac{\partial C}{\partial x} - n D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + n R \frac{\partial C}{\partial t} + n R \lambda C = 0$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{v}{R} \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C \quad (12)$$

que es la ecuación diferencial que describe la migración de los radionucleidos, en donde se ha considerado que la velocidad del agua y el coeficiente de difusión son constantes a través de todo el camino desde el contenedor hasta la superficie.

Si en lugar de un radionucleido consideramos una cadena de decaimiento, y tenemos en cuenta las aproximaciones antes mencionadas, el sistema de ecuaciones diferenciales para n nucleidos es /5/

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_1}{\partial t} &= \frac{D}{R_1} \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} - \frac{v}{R_1} \frac{\partial C_1}{\partial x} - \lambda_1 C_1 \\ \frac{\partial C_2}{\partial t} &= \frac{D}{R_2} \frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2} - \frac{v}{R_2} \frac{\partial C_2}{\partial x} - \lambda_2 C_2 + \frac{R_1}{R_2} \lambda_1 C_1 \\ &\vdots \\ \frac{\partial C_n}{\partial t} &= \frac{D}{R_n} \frac{\partial^2 C_n}{\partial x^2} - \frac{v}{R_n} \frac{\partial C_n}{\partial x} - \lambda_n C_n + \frac{R_{n-1}}{R_n} \lambda_{n-1} C_{n-1} \end{aligned} \quad (13)$$

Los dos últimos términos representan los radionucleidos que desaparecen por decaimiento radioactivo, y los que aparecen por decaimiento de su precursor respectivamente.

La condición de borde a la izquierda son las ecuaciones de Bateman, que, para el caso de 3 nucleidos es:

$$\begin{aligned} C_1(0,t) &= C_1^0 e^{-\lambda_1 t} \\ C_2(0,t) &= C_1^0 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + C_2^0 e^{-\lambda_2 t} \\ C_3(0,t) &= C_1^0 \lambda_1 \lambda_2 \left(\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right) + \frac{C_2^0 \lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_3 t}) + C_3^0 e^{-\lambda_3 t} \end{aligned} \quad (14)$$

4. METODOS NUMERICOS UTILIZADOS.

Se emplearon varios métodos numéricos para resolver el conjunto de ecuaciones, con el objeto de asegurar que los resultados obtenidos sean confiables, y los resultados se compararon.

4.1. METODO IMPLICITO; CRANK-NICOLSON

La forma general de esta formulación es

$$\exp \left(-\frac{1}{2} \Delta t L \right) C_m^{n+1} = \exp \left(\frac{1}{2} \Delta t L \right) C_m^n \quad (15)$$

en donde

Δt = incremento temporal
 C = concentración
 n = coordenada temporal
 m = coordenada espacial

El operador L (lineal), es en nuestro caso

$$L = \frac{D}{R} \frac{\delta x^2}{\Delta x^2} - \frac{v}{2R} \frac{\delta x}{\Delta x} - R_{i-1}/R_i \lambda_{i-1} + \lambda_i \quad (16)$$

donde i , se refiere al lugar que le corresponde al nucleido en la cadena de decaimiento.

δx^2 y δx son los operadores en diferencias de segundo y primer orden respectivamente y tienen la siguiente expresión cuando tratamos grillas variables /4/.

$$\delta x^2 = \frac{2}{h_2 (h_1 + h_2)} C_{m+1} - \frac{2 C_m}{h_1 h_2} + \frac{2}{h_1 (h_1 + h_2)} C_{m-1} \quad (17)$$

$$\delta x = - C_{m-1} \frac{h_2}{h_1 (h_1 + h_2)} - \frac{C_m (h_1 - h_2)}{h_1 h_2} + C_{m+1} \frac{h_1}{h_1 (h_1 + h_2)} \quad (18)$$

siendo h_1 y h_2 los espaciados de la grilla de dos intervalos espaciales consecutivos.

reemplazando (16) en (15), obtenemos

$$\begin{aligned} \exp \left(\frac{1}{2} \Delta t \left(\frac{D}{R} \delta x^2 C - \frac{v}{R} \delta x C - \frac{R_{i-1}}{R_i} \lambda_{i-1} + \lambda_i \right) \right) C_m^{n+1} = \\ \exp \left(\frac{1}{2} \Delta t \left(\frac{D}{R} \delta x^2 C - \frac{v}{R} \delta x C - \frac{k_{i-1}}{R_i} \lambda_{i-1} + \lambda_i \right) \right) C_m^n \end{aligned} \quad (19)$$

Considerando (17) y (18) y desarrollando obtenemos

$$Z_- C_{m-1}^{n+1} + Z C_m^{n+1} + Z_+ C_{m+1}^{n+1} = Y_- C_{m-1}^n + Y C_m^n + Y_+ C_{m+1}^n \quad (20)$$

en donde:

$$Z_- = - D - E \quad (21)$$

$$Z = 1 + B - F + IL \quad (22)$$

$$Z_+ = G - A \quad (23)$$

$$Y_- = D + E \quad (24)$$

$$Y = 1 - B + F - IL \quad (25)$$

$$Y_+ = A - G \quad (26)$$

y, además:

$$A = \frac{\Delta T \cdot D}{R_i \cdot h_m (h_{m-1} + h_m)} \quad (27)$$

$$B = \frac{\Delta T \cdot D}{R_i \cdot h_m \cdot h_{m-1}} \quad (28)$$

$$D = \frac{\Delta T \cdot D}{R_i \cdot h_{m-1} (h_{m-1} + h_m)} \quad (29)$$

$$E = \frac{\Delta T \cdot V \cdot h_2}{2 \cdot R_i \cdot h_{m-1} \cdot (h_{m-1} + h_m)} \quad (30)$$

$$F = \frac{\Delta T \cdot V \cdot (h_{m-1} - h_m)}{2 \cdot R_i \cdot (h_{m-1} - h_m)} \quad (31)$$

$$G = \frac{\Delta T \cdot V \cdot h_{m-1}}{2 \cdot R_i \cdot h_m (h_{m-1} - h_m)} \quad (32)$$

$$HL = \frac{2 \cdot \Delta T}{R(i)} \cdot \lambda (i - 1) \cdot R (i - 1) \quad (33)$$

$$IL = 2 \cdot \Delta T \cdot \lambda (i) \quad (34)$$

Por ser una formulación implícita, están involucrados tres valores desconocidos de C en tiempo avanzado. Siendo un problema parabólico, es necesario disponer de condiciones de borde iniciales y de entrada y salida en el espacio, para todo tiempo.

La matriz a invertir para encontrar la solución del problema, es una matriz rala de estructura de banda (entendiéndose por matriz rala aquella que tiene suficientes elementos cero para que se justifique usar una técnica especial que evite almacenar u operar con los ceros), que hemos invertido usando una rutina del paquete de subrutinas científicas de IBM (GELB).

Esta rutina resuelve un sistema simultáneo de ecuaciones lineales con una matriz de coeficientes rara de estructura de banda. Para hacerlo invierte cada vez la matriz, lo que lleva un tiempo de cómputo apreciable.

Con el fin de acortar los tiempos, y verificar los resultados se usó una subrutina del paquete de subrutinas científicas de Harwell, llamada MA28A. En ésta no se invierte la matriz todas las veces.

Los resultados obtenidos con ambas rutinas son totalmente coincidentes pero los tiempos de cómputo con la MA28A, son significativamente menores.

4.2. METODO EXPLICITO

La forma general de esta formulación es

$$C_m^{n+1} = \exp (\Delta t L) C_m^n \quad (35)$$

El operador L, es como lo definimos en (15).

Como puede deducirse los coeficientes varían respecto del método implícito correspondientemente con esta formulación y hay un sólo punto de la grilla en tiempo avanzado.

Como sabemos, la estabilidad de este método es dependiente del incremento temporal.

4.3. METODO DE LAS LINEAS

Para un sistema de ecuaciones diferenciales parciales como el considerado, se discretiza todas menos una de las variables independientes. Este procedimiento semidiscreto lleva a un sistema de ecuaciones diferenciales ordinario, las cuales son integradas numéricamente. En nuestro caso la discretización se realiza en el espacio.

Se usó el método de Gear para poder considerar problemas stiff (muy rígidos desde el punto de vista computacional ya que involucra incrementos temporales muy disímiles entre si).

Esto es muy útil para nuestro problema ya que las constantes de tiempo de los distintos radionucleidos pueden diferir considerablemente. Esto hace de este método, el mas confiable.

La rutina Harwell que usa este método es la rutina de Harwell DC01AD.

5. EJEMPLOS DE VERIFICACION.

Para verificar el comportamiento de los modelos desarrollados, se los utilizó en casos descritos en la bibliografía.

5.1. PRIMER EJEMPLO

Este problema se encuentra en la referencia /6/. Se trata de una cadena de 3 nucleidos, cuyo transporte y difusión, está descripto por las ecuaciones (13). Las condiciones de contorno son las ecuaciones de Bateman (14) a la izquierda, y concentracion cero en infinito, a la derecha. Esta condición se logró considerando una grilla que llega a 5200 m. Este punto

está lo suficientemente lejos como para que la condición impuesta no tenga influencia en las concentraciones obtenidas a 100 m, que es el punto analizado en este ejemplo.

Usando la técnica de la transformada de Laplace, Lester et al. (1975) derivaron una solución analítica para el sistema de ecuaciones diferenciales mencionado.

La solución para el caso especial cuando $R_1 = R_2 = R_3$ y cuando los nucleidos 2 y 3 no están originalmente en el repositorio (o sea: $C_2^0 = C_3^0 = 0$), puede ser escrita en forma simple:

$$C_i(Z,t) = C_i(0,t) \cdot C(Z,t) ; i = 1, 2, 3 \quad (36)$$

donde

$$C(Z,t) = 0,5 (\operatorname{erfc}(\arg 1 - \arg 2) + \exp(Pe) \operatorname{erfc}(\arg 1 + \arg 2)) \quad (37)$$

$$\text{siendo } \arg 1 = \left(\frac{R \cdot Pe \cdot Z}{4 V_f t} \right)^{1/2}$$

$$\text{y: } \arg 2 = \left(\frac{Pe V_f t}{4 R Z} \right)^{1/2}$$

Se compararon los resultados obtenidos con esta solución analítica con los obtenidos con el método implícito 4.1.

Los parámetros utilizados fueron

V_f = velocidad del fluido: $1,0 \times 10^{-6}$ m/s

Pe = número de Peclet = 0,5

R = factor de retención = $1,0 \times 10^3$, igual para los tres nucleidos

Z = distancia de la fuente = $1,0 \times 10^2$ m

T_1 = vida media del primer nucleido = 100 años

T_2 = vida media del segundo nucleido = 200 años

T_3 = vida media del tercer nucleido = 300 años

En las figuras 1, 2 y 3, podemos ver los resultados obtenidos usando la solución analítica y el modelo, para los tres nucleidos.

Los casos graficados corresponden a una grilla no uniforme, con 40 intervalos de 0.5 m, un $\Delta t = 10$ años y la distancia desde la fuente es 100 m.

Los resultados como se ve, son muy coincidentes.

5.2. SEGUNDO EJEMPLO

Este ejemplo es el caso 1 de /9/. Se trata de una cadena de tres radionucleidos, en un caso de larga vida y en otro de corta vida, y con dos juegos de valores de coeficientes de retención distintos, lo que da lugar a considerar 4 problemas diferentes.

La longitud de migración es 500 m. La velocidad intersticial del agua es 1 m/año. La difusividad es 50 m²/seg.

5.2.1. La cadena que aquí consideramos es de tres nucleidos de larga vida: U²³⁴, Th²³⁰ y Ra²²⁶, con las siguientes propiedades:

Núcleo	R	t _{1/2} (años)	Inventario (unidades de actividad)
U ²³⁴	300	2,445 x 10 ⁵	1,000
Th ²³⁰	20.000	7,7 x 10 ⁴	0,010
Ra ²²⁶	10.000	1,6 x 10 ³	0,004

Este problema fué resuelto por el método implícito, por el método explícito y por el de las líneas.

Se ha considerado una grilla de 22 nodos (para 40, los resultados no variaban sensiblemente). El incremento temporal, se ha tomado igual a 100 a para el método implícito y el explícito. En cuanto al método de las líneas, por su propia característica puede usar un incremento mucho mayor, ya que lo determina automáticamente la rutina que se usó en su resolución (DC01AD). En este caso el incremento tomado fue de 10.000.

Este método por las características mencionadas, es apto para problemas stiff y es el más confiable. Si bien es más lento que los otros métodos, verificamos que si se aumentaba, el incremento temporal hasta 100.000, los resultados eran exactamente iguales. Se recurrió a una opción de la rutina utilizada para conocer cual es el incremento temporal usado por la misma en cada intervalo de tiempo que en nuestro caso era de 10.000 a. El incremento menor encontrado para todo tiempo fue 163 a, a excepción del encontrado para 100.000 a que fue de 0.73 x 10⁻⁷ a, debido a la gran singularidad que representa la condición de lixiviación que se da justamente en ese tiempo. El incremento mínimo encontrado explica la bondad de los resultados obtenidos con los métodos implícito y explícito con incremento 100 a. Sería ilógico tener en cuenta el valor encontrado en los 100.000 a y extenderlo a todo tiempo ya que sólo lo encontramos en ese tiempo y por las razones expuestas.

Las condiciones de borde son las de Bateman a la izquierda y concentración nula en infinito, a la derecha.

El tiempo de lixiviación es de 100.000 años.

El Peclet correspondiente es igual a 10. Debido al bajo Peclet, se pudieron usar aproximaciones centradas.

En las figuras 4, 5 y 6 están representadas la actividad obtenida a la salida del camino de integración, L = 500 m, para los 3 nucleidos, con los tres distintos métodos mencionados.

La actividad resulta de multiplicar la concentración por la constante de decaimiento del nucleido correspondiente, luego las ecuaciones que se resolvieron, resultan de multiplicar en las ecuaciones (13), la concentración por la constante de decaimiento correspondiente.

Las figuras 7, 8 y 9 son la comparación de los tres métodos para cada nucleido.

En las figuras 10, 11 y 12 se comparan los resultados obtenidos con el experimento INTRACOIN /9/.

En la tabla 1, pueden observarse los valores de máxima actividad alcanzadas por cada radionucleído y el tiempo en que fueron alcanzados.

TABLA 1

	NUCLEIDO 1 (U^{234})		NUCLEIDO 2 (Th^{230})		NUCLEIDO 3 (Ra^{226})	
	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)
Promedios de 28 programas en el expe- rimento INTRACOIN	$3,83 \times 10^{-6}$	170.000	$3,54 \times 10^{-8}$	233.000	$6,76 \times 10^{-8}$	234.000
Método de las líneas	$3,60 \times 10^{-6}$	170.000	$3,37 \times 10^{-8}$	230.000	$6,73 \times 10^{-8}$	240.000
Método Explícito	$3,61 \times 10^{-6}$	170.000	$3,37 \times 10^{-8}$	230.000	$6,74 \times 10^{-8}$	240.000
Método Implícito	$3,60 \times 10^{-6}$	170.000	$3,37 \times 10^{-8}$	230.000	$6,73 \times 10^{-8}$	240.000

Los ejemplos que siguen a continuación han sido resueltos por el método implícito únicamente, ya que como vimos, los resultados obtenidos con los tres métodos son coincidentes.

Las condiciones de borde son las mismas que en 5-2-1, así como también son iguales la longitud de migración, la velocidad intersticial del agua, la difusividad y el tiempo de lixiviación.

Las figuras que se encuentran en lo que sigue, pueden dividirse en dos grupos distintos: los que representan los valores de la actividad a la salida del camino de integración para todos los radionucleídos de la cadena y los que comparan los valores de actividad obtenidos, con los del experimento INTRACOIN/9/.

En las tablas 2 a 12 se observan los valores de máxima actividad alcanzados por cada radionucleído y el tiempo en que fueron alcanzados.

5.2.2. En este problema, la cadena es la misma que en 5.2.1, pero los factores de retención son otros:

Elemento	R
U^{234}	60
Th^{230}	500
Ra	20

TABLA 2

	NUCLEIDO 1 (U^{234})		NUCLEIDO 2 (Th^{230})		NUCLEIDO 3 (Ra^{226})	
	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)
Promedios de 21 programas en el expe- rimento INTRACOIN	$8,138 \times 10^{-6}$	65.000	$6,217 \times 10^{-7}$	131.000	$2,042 \times 10^{-5}$	125.000
Modelo	$8,205 \times 10^{-6}$	60.000	$6,720 \times 10^{-7}$	130.000	$2,138 \times 10^{-5}$	120.000

Los resultados obtenidos están en las figuras 13, 14, 15 y 16.

5.2.3. En este caso, la cadena de 3 radionucleidos que se analiza, es de corta vida media: Cm^{245} , Np^{237} y U^{233} , con las siguientes propiedades:

Núcleo	R	t _{1/2} (años)	Inventario (unidades de actividad)
Cm^{245}	5.000	$8,500 \times 10^3$	0,700
Np^{237}	700	$2,140 \times 10^6$	1,000
U^{233}	300	$1,592 \times 10^5$	0,004

Vemos de la figura 17 que para los tiempos analizados, el primer nucleido ya no se encuentra

TABLA 3

	NUCLEIDO 2 (Np^{237})		NUCLEIDO 3 (U^{233})	
	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)
Promedios de 22 pro- gramas en el experi- mento INTRACOIN	$2,83 \times 10^{-6}$	322.000	$3,75 \times 10^{-6}$	254.000
Modelo	$2,46 \times 10^{-6}$	330.000	$3,41 \times 10^{-6}$	230.000

Los resultados obtenidos están en las figuras 17, 18 y 19.

5.2.4. En este caso se resuelve el mismo problema que en el caso anterior pero con distintos coeficientes de retención

	R
Cm ²⁴⁵	60
Np ²³⁷	200
U ²³³	60

TABLA 4

	NUCLEIDO 1 (Cm ²⁴⁵)		NUCLEIDO 2 (Np ²³⁷)		NUCLEIDO 3 (U ²³³)	
	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)
Promedios de 21 programas en el expe- rimento INTRACON	3,712x 10 ⁻⁷	27.200	7,735x 10 ⁻⁶	137.000	5,879x 10 ⁻⁶	119.500
Modelo	3,378x 10 ⁻⁷	30.000	6,86 x 10 ⁻⁶	120.000	5,640x 10 ⁻⁶	110.000

Los resultados obtenidos están en las figuras 20, 21, 22 y 23.

5.3. TERCER EJEMPLO

Corresponde al caso 2 de /9/. La serie de valores básicos es la misma del ejemplo 2 en donde el camino de migración ha sido dividido en tres zonas distintas con tres coeficientes de retención distintos. La grilla utilizada desde este caso en adelante es de 40 puntos, ya que se vio al comparar con los otros programas que 20 puntos no eran suficientes.

Las tres zonas consideradas son:

Zona 1: hasta 50 m

Zona 2: desde 50 m hasta 150 m

Zona 3: desde 150 m hasta el final del recinto de integración.

5.3.1. La cadena considerada es U²³⁴, Th²³⁰, Ra²²⁶ y los factores de retención para cada radionucleído en las tres zonas distintas son:

ELEMENTO	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3
U ²³⁴	600	300	150
Th ²³⁰	40.000	20.000	10.000
Ra ²²⁶	20.000	10.000	5.000

TABLA 5

	NUCLEIDO 1 (U^{234})		NUCLEIDO 2 (Th^{230})		NUCLEIDO 3 (Ra^{226})	
	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)
Promedios de 10 programas en el expe- rimento INTRACON	$5,504 \times 10^{-6}$	153.000	$4,572 \times 10^{-8}$	197.000	$7,637 \times 10^{-8}$	203.000
Modelo	$3,603 \times 10^{-6}$	170.000	$3,367 \times 10^{-8}$	230.000	$6,730 \times 10^{-8}$	240.000

Los resultados que se obtuvieron están en las figuras 24, 25, 26 y 27.

5.3.2. En este caso se ha considerado la misma cadena radioactiva que en el caso anterior. Las distintas zonas del camino de integración son también las mismas, pero los coeficientes de retención correspondientes a dichas zonas son distintas.

ELEMENTO	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3
U	300	60	30
Th	5.000	500	250
Ra	2.000	20	10

TABLA 6

	NUCLEIDO 1 (U^{234})		NUCLEIDO 2 (Th^{230})		NUCLEIDO 3 (Ra^{226})	
	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)
Promedios de 10 programas en el expe- rimento INTRACON	$8,321 \times 10^{-6}$	56.000	$5,613 \times 10^{-7}$	126.000	$1,221 \times 10^{-5}$	121.000
Modelo	$8,205 \times 10^{-6}$	60.000	$6,720 \times 10^{-7}$	130.000	$2,138 \times 10^{-5}$	120.000

Los resultados correspondientes pueden verse en las figuras 28, 29, 30 y 31

5.3.3. La cadena radioactiva que se contempla en este caso es Cm^{245} , Np^{237} , U^{233} . El camino de migración está dividido en las tres mismas zo-

nas que en los dos casos anteriores, con los siguientes factores de retención.

ELEMENTO	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3
Cm ²⁴⁵	10.000	5.000	2.500
Np ²³⁷	1.400	700	350
U ²²⁶	600	300	150

TABLA 7

	NUCLEIDO 2 (Np ²³⁷)		NUCLEIDO 3 (U ²³³)	
	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)
Promedios de 11 programas en el experimento INTRACOIN	4,664x 10 ⁻⁶	284.000	4,825x 10 ⁻⁶	204.000
Modelo	4,596x 10 ⁻⁶	210.000	4,572x 10 ⁻⁶	160.000

Los resultados obtenidos pueden verse en las figuras 32, 33 y 34.

5.3.4. Las condiciones de este caso son las mismas que en anterior, salvo los coeficientes de retención que en este caso son:

ELEMENTO	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3
Cm ²⁴⁵	500	60	30
Np ²³⁷	700	200	100
U ²³³	300	60	30

TABLA 8

	NUCLEIDO 1 (Cm ²⁴⁵)		NUCLEIDO 2 (Np ²³⁷)		NUCLEIDO 3 (U ²²⁶)	
	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)
Promedios de 12 programas en el experimento INTRACOIN	1,818x 10 ⁻⁷	35.000	8,943x 10 ⁻⁶	142.000	5,941x 10 ⁻⁶	115.000
Modelo	3,583x 10 ⁻⁷	30.000	8,995x 10 ⁻⁶	100.000	5,812x 10 ⁻⁶	110.000

Los resultados obtenidos pueden verse en las figuras 35, 36, 37 y 38.

5.4. CUARTO EJEMPLO

Corresponde al caso 3 del experimento INTRACOIN /9/.

Este ejemplo está basado en la misma serie de valores que los dos ejemplos anteriores pero con factores de retención continuamente variantes.

La variación de los factores de retención con la distancia está expresada en forma analítica como sigue

$$R = G + H * \frac{Z}{L}$$

Z, es la coordenada que indica el lugar del camino de migración a que nos referiremos y L, es la longitud del camino de integración (en nuestro caso L = 500 m)

Las constantes G y H, varían según cuatro casos distintos que describimos a continuación.

5.4.1. En este caso la cadena que consideramos es U^{234} , Th^{230} y Ra^{226} ; y los coeficientes G y H son:

Elemento	G	H
U^{234}	600	-450
Th^{230}	40.000	-30.000
Ra	20.000	-15.000

Es decir que los coeficientes de retención de cada uno de los tres radionucléidos son:

$$\begin{aligned} R(1) &= 600 - 450 Z(K)/500 \\ R(2) &= 40.000 - 30.000 Z(K)/500 \\ R(3) &= 20.000 - 15.000 Z(K)/500 \end{aligned}$$

TABLA 9

	NUCLEIDO 1 (U^{234})		NUCLEIDO 2 (Th^{230})		NUCLEIDO 3 (Ra^{226})	
	Actividad (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Actividad (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Actividad (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)
Promedios de 11 programas en el experimento INTRACOIN	$3,07 \times 10^{-6}$	191.600	$3,009 \times 10^{-8}$	254.000	$5,958 \times 10^{-8}$	257.000
Modelo	$3,238 \times 10^{-6}$	180.000	$2,988 \times 10^{-8}$	260.000	$5,998 \times 10^{-8}$	250.000

Los valores obtenidos pueden verse en las figuras 39, 40, 41 y 42.

5.4.2. Este caso resuelve el mismo problema que el caso anterior, pero los valores de los factores de retención son distintos:

Elemento	G	H
U^{234}	300	-270
Th^{230}	5.000	-4.750
Ra^{226}	2.000	-1.990

TABLA 10

	NUCLEIDO 1 (U^{234})		NUCLEIDO 2 (Th^{230})		NUCLEIDO 3 (Ra^{226})	
	Actividad (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Actividad (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Actividad (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)
Promedios de 6 programas en el expe- rimento INTRACON	$5,948 \times 10^{-6}$	128.000	$2,318 \times 10^{-7}$	166.000	$9,733 \times 10^{-7}$	169.800
Modelo	$6,276 \times 10^{-6}$	120.000	$2,466 \times 10^{-7}$	160.000	$9,688 \times 10^{-7}$	150.000

Los resultados obtenidos pueden verse en las figuras 43, 44, 45 y 46.

5.4.3. La cadena que se resuelve en este caso es Cm^{245} , Np^{237} y U^{233} . Los coeficientes G y H son:

Elemento	G	H
Cm^{245}	10.000	-7.500
Np^{237}	1.400	-1.050
U^{233}	600	-450

Los valores de actividad obtenidos muestran que para los tiempos analizados el primer nucleido ya no existe.

TABLA 11

	NUCLEIDO 2 (Np^{237})		NUCLEIDO 3 (U^{233})	
	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)
Promedios de 6 programas en el experimento INTRACOIN	$2,562 \times 10^{-6}$	461.400	$3,878 \times 10^{-6}$	285.000
Modelo	$2,316 \times 10^{-6}$	350.000	$3,311 \times 10^{-6}$	270.000

Los resultados obtenidos pueden verse en las figuras 47, 48 y 49.

5.4.4. Este caso resuelve el mismo problema que el caso anterior con distintos coeficientes de retención.

Los valores de G y H para este caso son:

Elemento	G	H
Cm^{245}	500	-470
Np^{237}	700	-600
U^{233}	300	-270

TABLA 12

	NUCLEIDO 1 (Cm^{245})		NUCLEIDO 2 (Np^{237})		NUCLEIDO 3 (U^{226})	
	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)	Máx. activ. (Unidades de activ.)	T máx. activ. (años)
Promedios de 7 programas en el experimento INTRACOIN	$3,937 \times 10^{-9}$	53.000	$4,578 \times 10^{-6}$	207.000	$4,467 \times 10^{-6}$	157.000
Modelo	$4,379 \times 10^{-9}$	60.000	$4,885 \times 10^{-6}$	200.000	$4,719 \times 10^{-6}$	150.000

Los resultados obtenidos pueden verse en las figuras 50, 51, 52 y 53.

6. DISCUSION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A través de los resultados obtenidos en los ejemplos presentados, podemos inferir que el modelo se ajusta a los requerimientos del caso.

A partir del ejemplo 1, vemos que cuando es posible comparar con una solución analítica, el modelo responde correctamente.

Del ejemplo 2 caso 1, vemos que los resultados obtenidos con distintos métodos numéricos son coincidentes, lo que habla de la corrección de cada método numérico.

Los programas desarrollados admiten mayor cantidad de nodos en la grilla de cálculo y ésta a su vez puede ser fija o variable, lo que permite ductilidad en las condiciones de contorno. Se admiten también cadenas de mayor número de nucleídos.

Siendo el P_e bajo, se han podido usar aproximaciones centradas. Si se consideran más nucleídos, esta situación podría cambiar y se usarían aproximaciones no centradas, para evitar oscilaciones en el frente de la onda de migración.

Se ha podido analizar varios casos, teniendo en cuenta dos cadenas de radionucleídos distintas, una de larga vida media U^{234} , Th^{230} y Ra^{226} y otra de corta vida media Cm^{245} , Np^{237} , U^{233} .

Los distintos juegos de factores de retención que se han usado en los ejemplos 2, 3 y 4, representan distintos medios en donde se produce la migración.

En el ejemplo 2, vemos que en el caso 2, los valores de la actividad que alcanzan los nucleídos son mayores que en el caso 1 y es coherente con que los factores de retención en el caso 2, son menores que uno. Lo mismo ocurre con el caso 4, respecto del caso 3.

Tanto para los casos de la cadena de larga vida, como para los de la cadena de corta vida, la coincidencia de los valores obtenidos respecto de los resultados del experimento INTRACOIN es muy buena.

En el ejemplo 3, en el que se ha considerado que los factores de retención de los radionucleídos varían en forma escalonada en el medio donde migran, vemos que el efecto de los menores factores de retención es el de aumentar la actividad, como ya vimos en el ejemplo anterior.

En el ejemplo cuatro se ha considerado que los factores de retención varían linealmente según la forma analítica expuesta.

El análisis de los resultados de este ejemplo nos permite hacer los mismos comentarios que en el ejemplo anterior.

Tanto para el ejemplo 3 como para el 4, hemos tomado grillas de 40 puntos, ya que para 20 puntos los resultados obtenidos no eran satisfactorios. Pudimos observar que los valores que se obtenían eran muy sensibles a la discretización. Con 40 puntos se obtuvieron resultados en buena coincidencia con los mostrados en INTRACOIN.

En el rango utilizado no se han encontrado dificultades mayores en el caso unidimensional. Es lógico esperar lo mismo cuando se trate el caso bidimensional.

REFERENCES

- (1) Bo, P. y Carlsen, L. "DIFMIG - A computer program for calculation of diffusive migration through multi-barrier system." Roskilde, Dinamarca, Risoe National Lab., 1981. RISO-M-2262. 32p.
- (2) Crank, J. "The mathematics of diffusion". Oxford, Clarendon Press, 1975.
- (3) Aikens, A. et al. "Generic methodology for assessment of radiation doses from groundwater migration of radionuclides in LWR wastes in shallow land burial trenches". Washington, Atomic Industrial Forum Inc., 1979. AIF/NESP - 013.
- (4) Pastor, J.; Calleja, P. y Trejo, C. "Análisis matemático. Volumen III. Análisis funcional y aplicaciones". Buenos Aires, Editorial Kapeluz, 3 edit., 1965. 718 p.
- (5) Burkholder, H.C. and Rosinger, E.L.J. "A model for the transport of radionuclides and their decay products through geological media". Pinawa, Canada, Atomic Energy of Canada Ltd., 1979. AECL - 6325. ONWI - 11. 17p. 7 refs.
- (6) Rasmuson, A. and Neretnieks, I. "Radionuclide chain migration in fissured rock. The influence of matrix diffusion." Stockholm, Svensk Kaernbraenslefoersorjning AB, 1982. SKBF - KBS - TR - 82-04. 69 p.
- (7) Yu, Ch.; Jester, W.A. and Jarret, A.R. "Simultaneous determination of dispersion coefficients and retardation factors for a low level radioactive waste burial site". Radioact. Waste Manage. Nucl. Fuel Cycle; vol. 4, n° 4, p. 401-420 (1984).
- (8) Bigersson, L. and Neretnieks, I. "Diffusion in the matrix of granitic rock. Field test in the Stripa mine. Part 2". Stockholm, Svensk, Kaernbraenslefoersorjning AB, 1983. SKBF-KBS-TR-83-39. 38 p.
- (9) Statens Kärnkraftinspektion. "INTRACON: International Nuclide Transport Code Intercomparison Study. Final report level 1. Code verification". Stockholm, Statens Kärnkraftinspektion (Swedish Nuclear Power Inspectorate), 1984. SKI-84:3.
- (10) Atomic Energy of Canada Ltd. "Radioactive waste repository study. Part 2". Pinawa, Canada, Atomic Energy of Canada Ltd., 1978. AECL-6188-2. 198 p.

LISTA DE FIGURAS

- Fig. 1 Nucleído 1, comparación con solución analítica.
 $R_1 = R_2 = R_3$
Vidas medias $T_1 = 100$, $T_2 = 200$, $T_3 = 300$ años
 ∇ = solución numérica
 $\boxplus$ = solución analítica
- Fig. 2 Nucleído 2, comparación con solución analítica.
 $R_1 = R_2 = R_3$
Vidas medias $T_1 = 100$, $T_2 = 200$, $T_3 = 300$ años
 ∇ = solución numérica
 $\boxplus$ = solución analítica
- Fig. 3 Nucleído 3, comparación con solución analítica
 $R_1 = R_2 = R_3$
Vidas medias $T_1 = 100$, $T_2 = 200$, $T_3 = 300$ años
 ∇ = solución numérica
 $\boxplus$ = solución analítica
- Fig. 4 Método explícito
 $Pe = 10.22$ nodos, $\Delta t = 100$ años. $L = 500$ m
 ∇ = actividad U^{234}
 $\boxplus$ = actividad Th^{230}
 $\boxminus$ = actividad Ra^{226}
- Fig. 5 Método implícito
 $Pe = 10.22$ nodos, $\Delta t = 100$ años. $L = 500$ m
 ∇ = actividad U^{234}
 $\boxplus$ = actividad Th^{230}
 $\boxminus$ = actividad Ra^{226}
- Fig. 6 Método de las líneas
 $Pe = 10.22$ nodos, $\Delta t = 100$ años. $L = 500$ m
 ∇ = actividad U^{234}
 $\boxplus$ = actividad Th^{230}
 $\boxminus$ = actividad Ra^{226}
- Fig. 7 Nucleídos 1 (U^{234}). Comparación de tres métodos numéricos
 $Pe = 10.22$ nodos - $L = 500$ m
 ∇ = método de las líneas. $\Delta t = 10.000$ años
 $\boxplus$ = método explícito. $\Delta t = 100$ años
 $\boxminus$ = método implícito. $\Delta t = 100$ años
- Fig. 8 Nucleído 2 (Th^{230}). Comparación de tres métodos numéricos
 $Pe = 10.22$ nodos - $L = 500$ m
 ∇ = método de las líneas. $\Delta t = 10.000$ años
 $\boxplus$ = método explícito. $\Delta t = 100$ años
 $\boxminus$ = método implícito. $\Delta t = 100$ años
- Fig. 9 Nucleído 3 (Ra^{226}). Comparación de tres métodos numéricos
 $Pe = 10.22$ nodos. $L = 500$ m
 ∇ = método de las líneas. $\Delta t = 10.000$ años
 $\boxplus$ = método explícito. $\Delta t = 100$ años
 $\boxminus$ = método implícito. $\Delta t = 100$ años

- Fig. 10 Nucleído 1 (U^{234})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 22 nodos
- Fig. 11 Nucleído 2 (Th^{230})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 22 nodos
- Fig. 12 Nucleído 3 (Ra^{226})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 22 nodos
- Fig. 13 Ejemplo 2. Caso 2
Pe 10.22 nodos. $\Delta t = 100$ años. L = 500 m
 ∇ = actividad U^{234}
 $\boxplus$ = actividad Th^{230}
 $\boxminus$ = actividad Ra^{226}
- Fig. 14 Nucleído 1 (U^{234})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 22 nodos
- Fig. 15 Nucleído 2 (Th^{230})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 22 nodos
- Fig. 16 Nucleído 3 (Ra^{226})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 22 nodos
- Fig. 17 Ejemplo 2 - Caso 3
Pe 10.22 nodos - $\Delta t = 100$ años. L 500 m.
 ∇ = Actividad Np^{231}
 $\boxplus$ = actividad U^{233}
- Fig. 18 Nucleído 2 (Np^{231})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 22 nodos
- Fig. 19 Nucleído 3 (U^{233})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 22 nodos
- Fig. 20 Ejemplo 2 - Caso 4
Pe = 10.22 nodos $\Delta t = 100$ años. L = 500 m
 ∇ = actividad Cm^{245}
 $\boxplus$ = actividad Np^{231}
 $\boxminus$ = actividad U^{233}
- Fig. 21 Nucleído 1 (Cm^{245})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 22 nodos
- Fig. 22 Nucleído 2 (Np^{231})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 22 nodos

- Fig. 23 Nucleído 3 (U^{233})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 22 nodos
- Fig. 24 Ejemplo 3 - Caso 1
Pe = 10.22 nodos $\Delta t = 100$ años. L = 500 años
 ∇ = actividad U^{234}
 $\boxplus$ = actividad Th^{230}
 $\boxminus$ = actividad Ra^{226}
- Fig. 25 Nucleído 1 (U^{234})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 22 nodos
- Fig. 26 Nucleído 2 (Th^{230})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 22 nodos
- Fig. 27 Nucleído 3 (Ra^{226})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 22 nodos
- Fig. 28 Ejemplo 3 - Caso 2
Pe = 10.22 nodos $\Delta t = 100$ años. L = 500 años
 ∇ = actividad U^{234}
 $\boxplus$ = actividad Th^{230}
 $\boxminus$ = actividad Ra^{226}
- Fig. 29 Nucleído 1 (U^{234})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 22 nodos
- Fig. 30 Nucleído 2 (Th^{230})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 22 nodos
- Fig. 31 Nucleído 3 (Ra^{226})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 22 nodos
- Fig. 32 Ejemplo 3 - Caso 3
Pe = 10.22 nodos $\Delta t = 100$ años. L = 500 m
 ∇ = actividad Np^{231}
 $\boxplus$ = actividad U^{233}
- Fig. 33 Nucleído 2 (Np^{231})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 42 nodos
- Fig. 34 Nucleído 3 (U^{233})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 42 nodos
- Fig. 35 Ejemplo 3 - Caso 4
Pe = 10.22 nodos $\Delta t = 100$ años. L = 500 m
 ∇ = actividad Cm^{245}
 $\boxplus$ = actividad Np^{231}
 $\boxminus$ = actividad U^{233}

- Fig. 36 Nucleído 1 (Cm^{245})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 42 nodos
- Fig. 37 Nucleído 2 (Np^{231})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 42 nodos
- Fig. 38 Nucleído 3 (U^{233})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 42 nodos
- Fig. 39 Ejemplo 4 - Caso 1
Pe = 10.22 nodos. Δt = 100 años. L = 500 m.
V = actividad U^{234}
▣ = actividad Th^{230}
▣ = actividad Ra^{226}
- Fig. 40 Nucleído 1 (U^{234})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 42 nodos
- Fig. 41 Nucleído 2 (Th^{230})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 42 nodos
- Fig. 42 Nucleído 3 (Ra^{226})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 42 nodos
- Fig. 43 Ejemplo 4 - Caso 2
Pe = 10.22 nodos. Δt = 100 años. L = 500 años
V = actividad U^{234}
▣ = actividad Th^{230}
▣ = actividad Ra^{226}
- Fig. 44 Nucleído 1 (U^{234})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 42 nodos
- Fig. 45 Nucleído 2 (Th^{230})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 42 nodos
- Fig. 46 Nucleído 3 (Ra^{226})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 42 nodos
- Fig. 47 Ejemplo 4 - Caso 3
Pe = 10.22 nodos. Δt = 100 años. L = 500 años
V = actividad Np^{231}
▣ = actividad U^{233}
- Fig. 48 Nucleído 2 (Np^{231})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 42 nodos
- Fig. 49 Nucleído 3 (U^{231})
Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/
Pe = 10 - 42 nodos

Fig. 50 Ejemplo 4 - Caso 4

$P_e = 10.22$ nodos. $\Delta t = 100$ años. $L = 500$ m

∇ = actividad Cm^{245}

$\boxplus$ = actividad Np^{231}

$\boxminus$ = actividad U^{233}

Fig. 51 Nucleído 1 (Cm^{245})

Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/

$P_e = 10 - 42$ nodos

Fig. 52 Nucleído 2 (Np^{231})

Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/

$P_e = 10 - 42$ nodos

Fig. 53 Nucleído 3 (U^{233})

Comparación de resultados con el experimento INTRACOIN /9/

$P_e = 10 - 42$ nodos

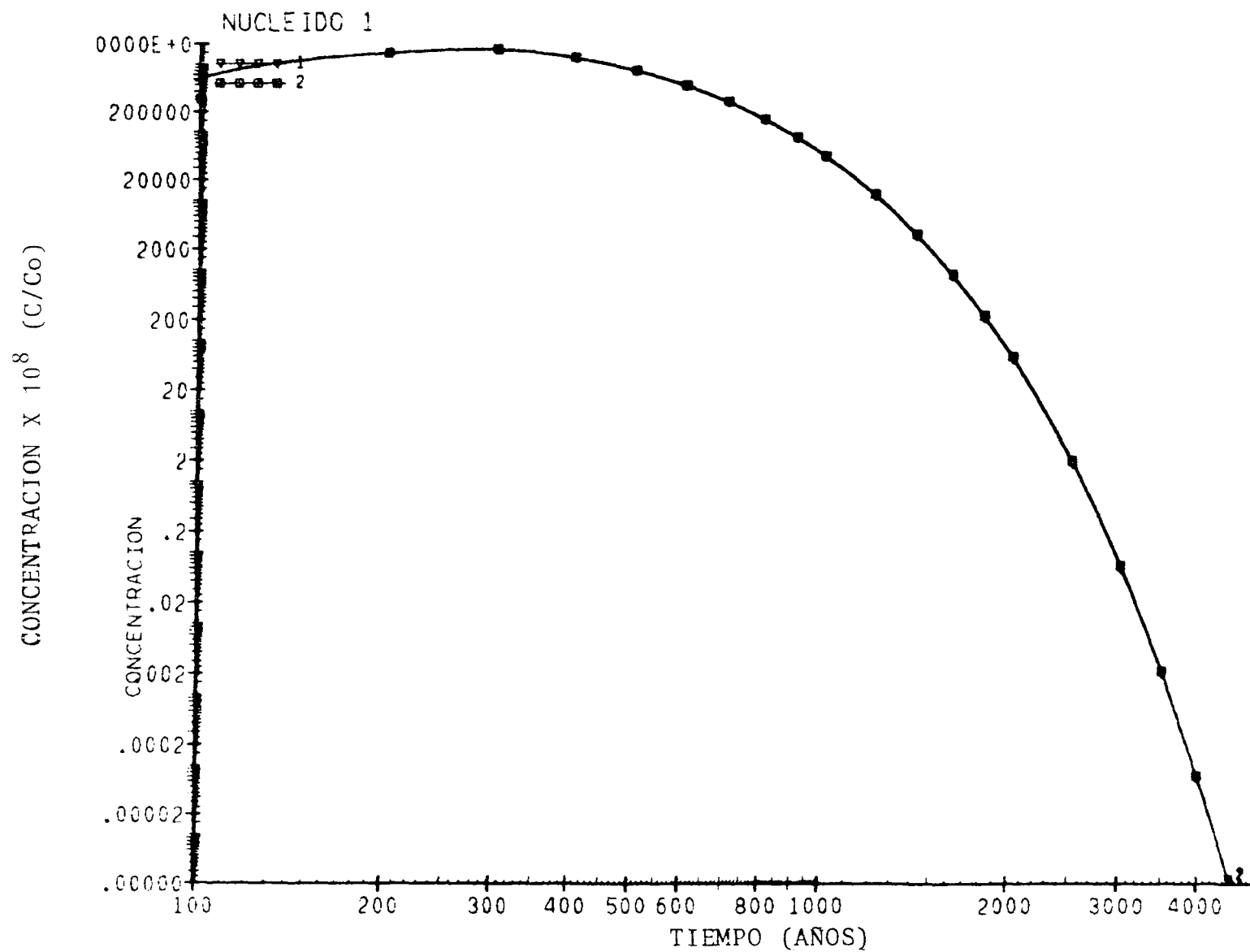


FIGURA 1 - Nucleido 1, comparación con solución analítica.

$R_1 = R_2 = R_3$

Vidas medias $T_1 = 100$, $T_2 = 200$, $T_3 = 300$ años

∇ = solución numérica

$\square$ = solución analítica

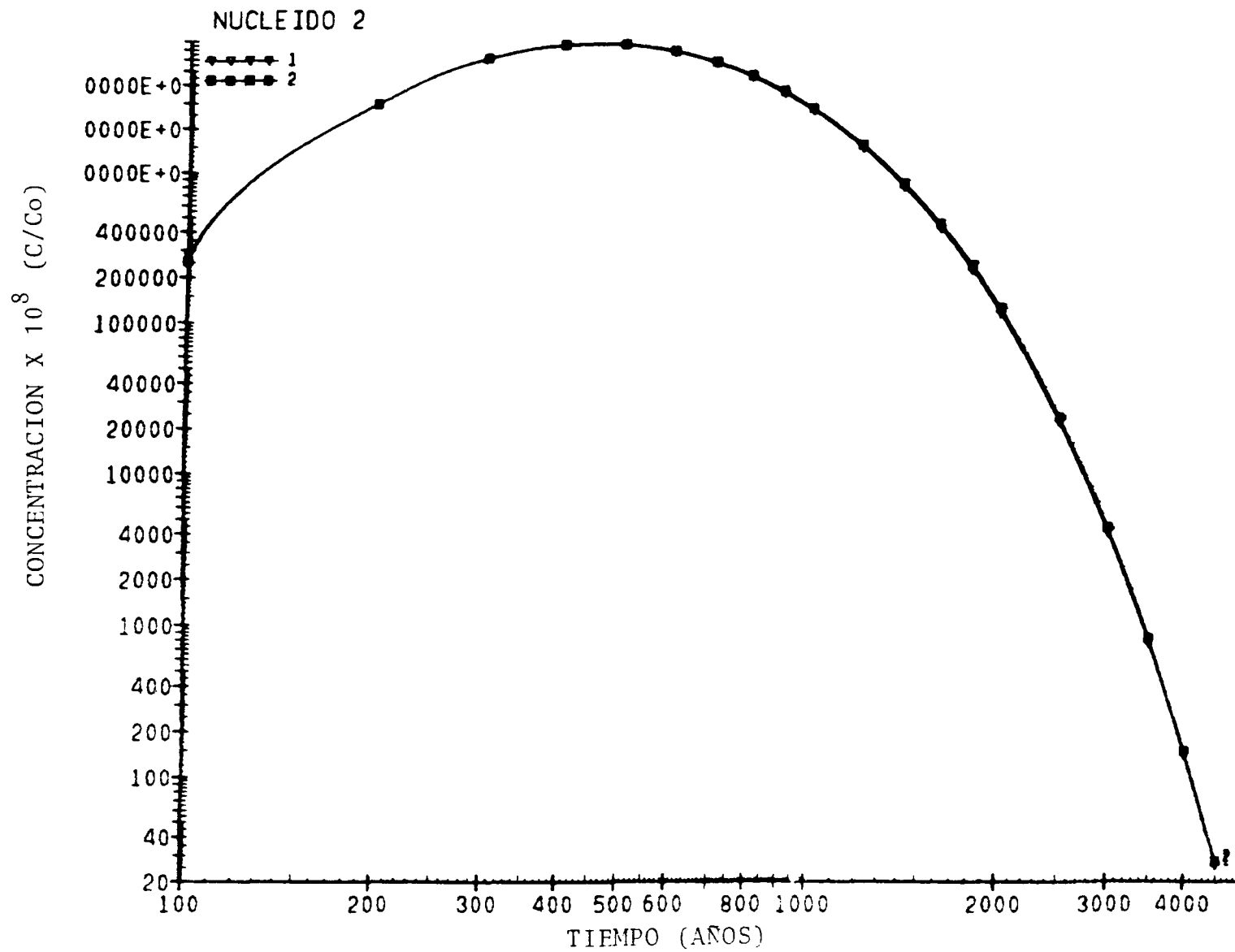


FIGURA 2 - Nucleido 2, comparación con solución analítica.

$$R_1 = R_2 = R_3$$

Vidas medias $T_1 = 100$, $T_2 = 200$, $T_3 = 300$ años

□ = solución numérica

○ = solución analítica

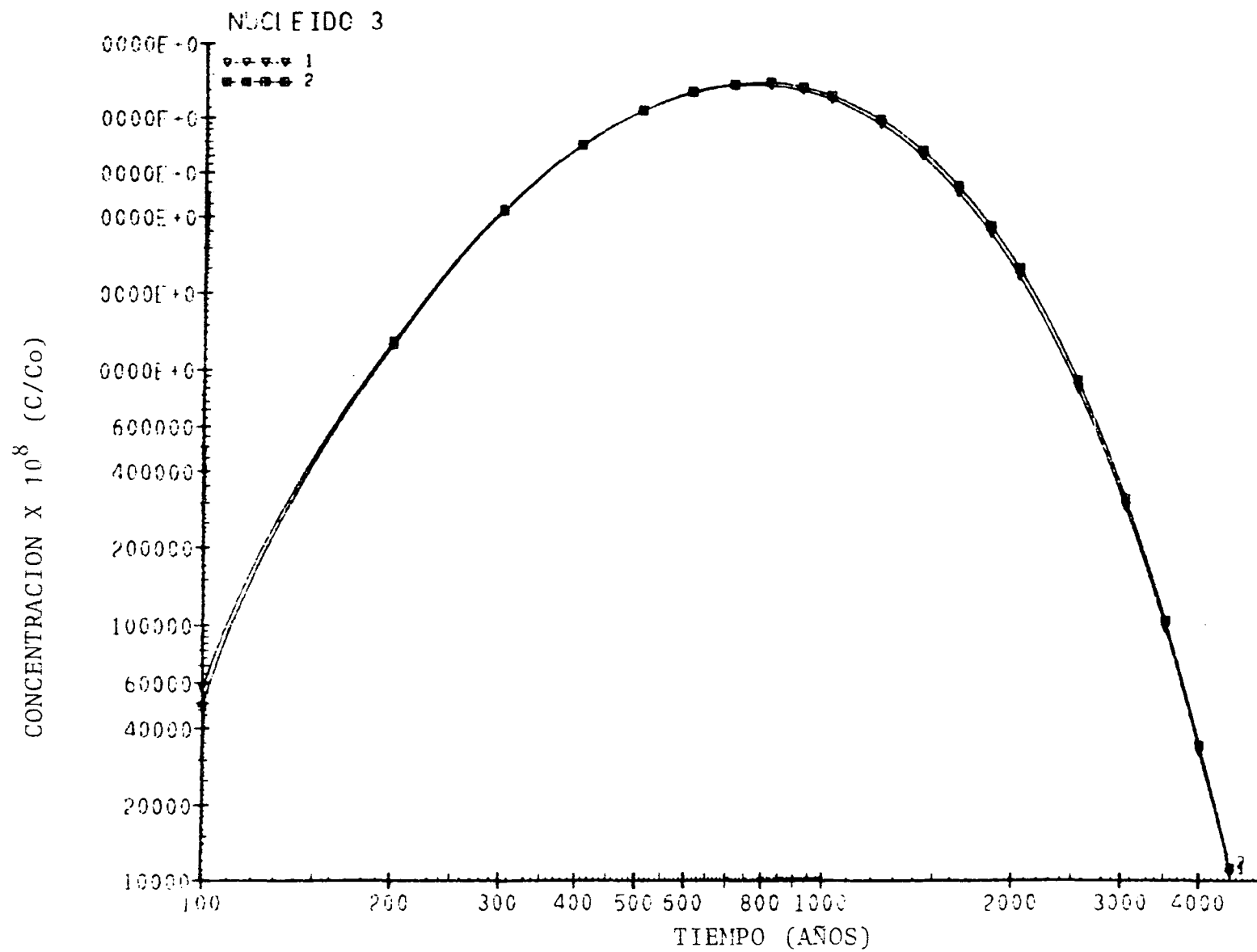


FIGURA 3 - Nucleido 3, comparación con solución analítica
 $R_1 = R_2 = R_3$
 Vidas medias $T_1 = 100$, $T_2 = 200$, $T_3 = 300$ años
 ▽ = solución numérica
 ■ = solución analítica

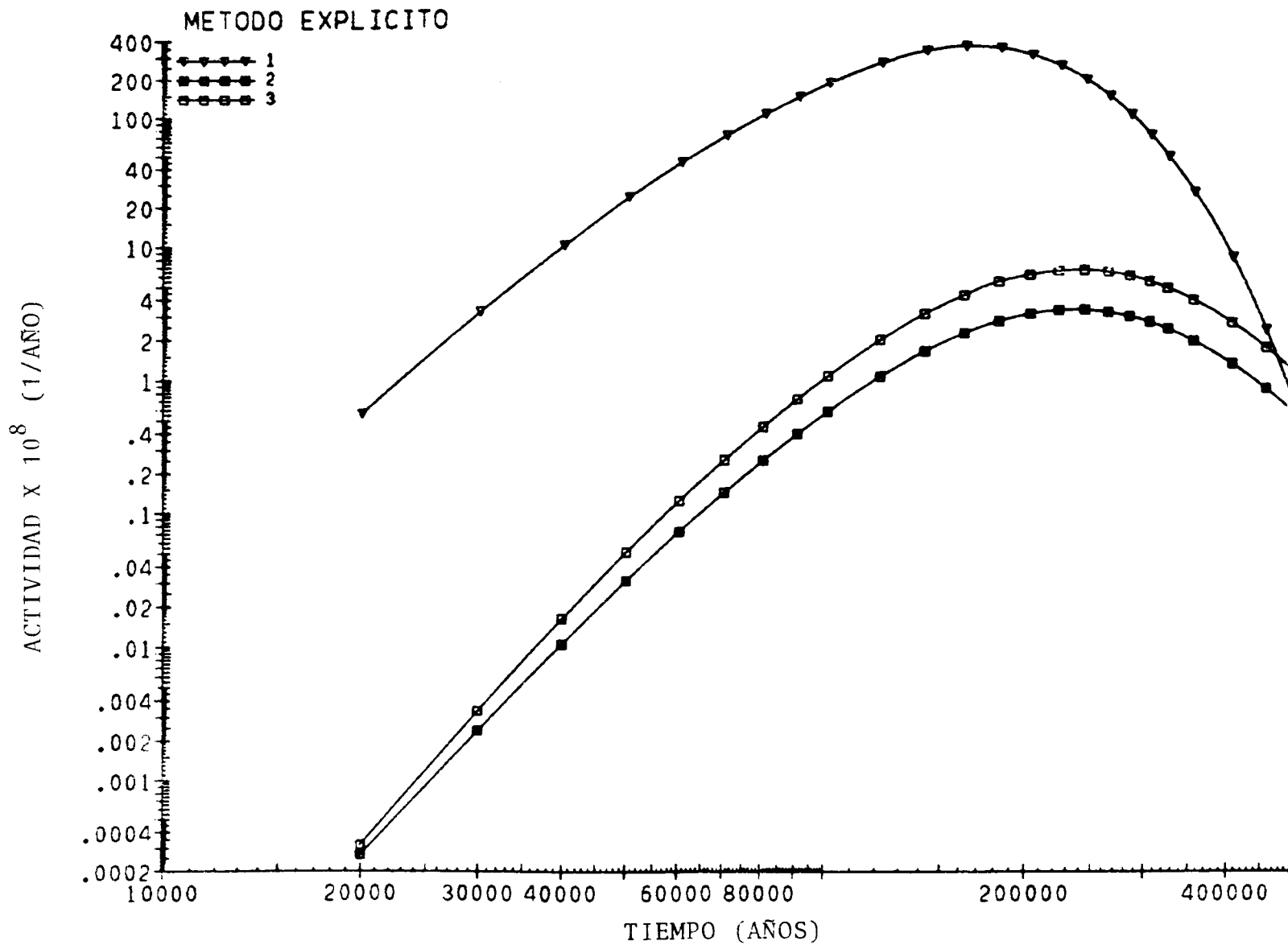


FIGURA 4 - Método explícito
 PE = 10.22 nodos, $\Delta t = 100$ años . L = 500 m
 ∇ = actividad U^{234}
 $\blacksquare$ = actividad Th^{230}
 $\bullet$ = actividad Ra^{226}

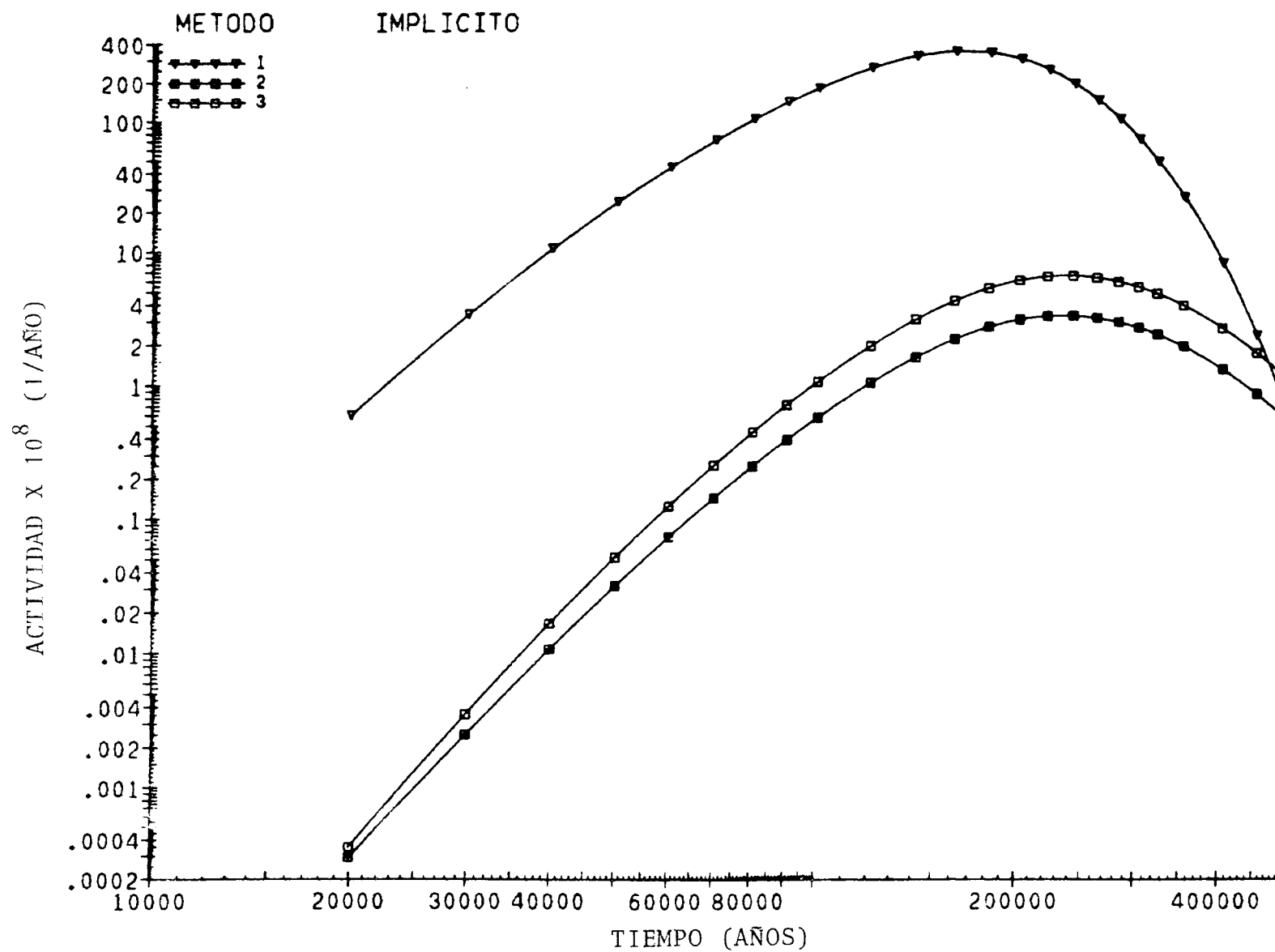


FIGURA 5 - Método implícito
 $Pe = 10.22$ nodos - $\Delta t = 100$ años. $L = 500$ m
 ∇ = actividad U^{234}
 $\blacksquare$ = actividad Th^{230}
 $\bullet$ = actividad Ra^{226}

METODO DE LAS LINEAS

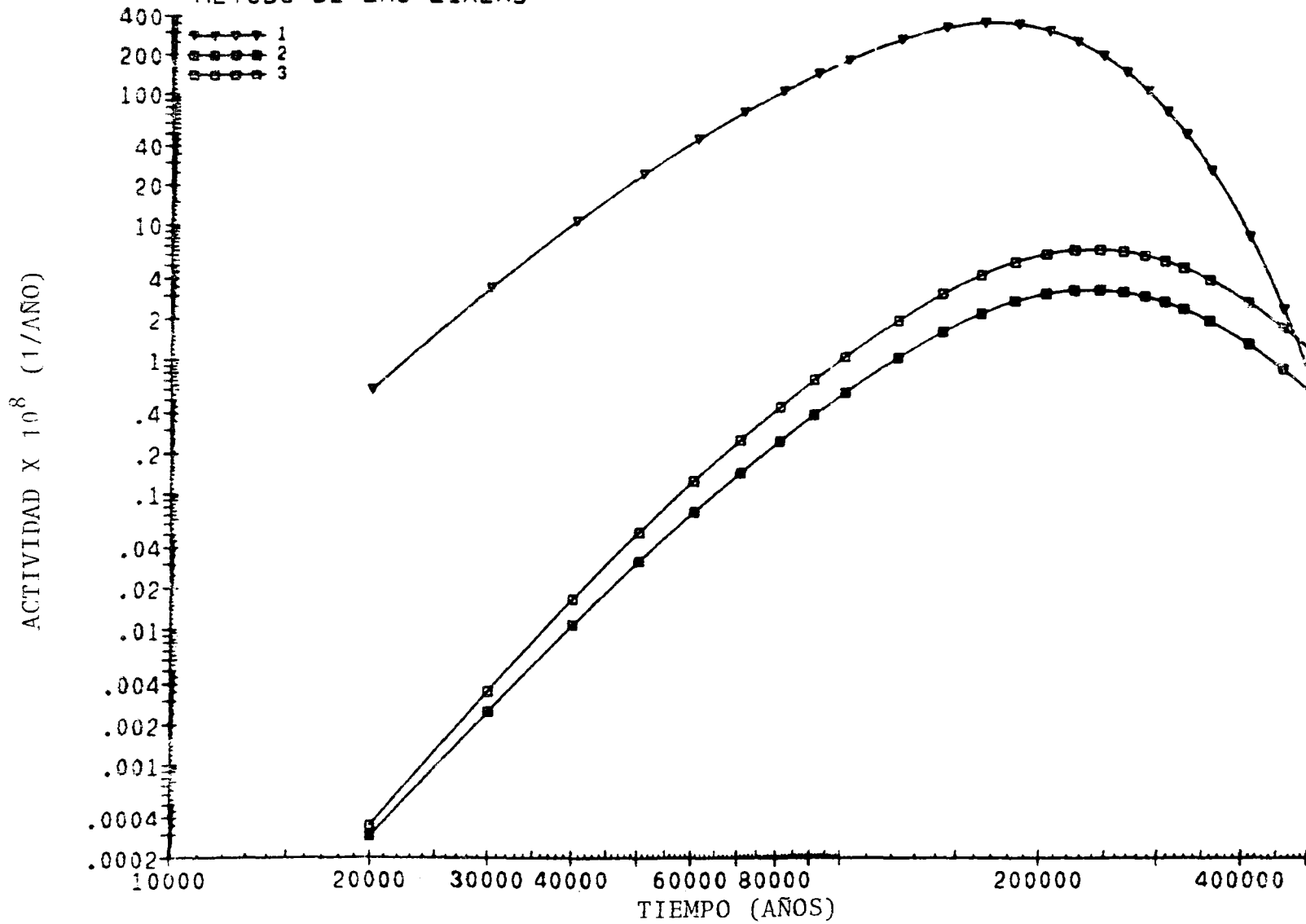


FIGURA 6 - Método de las líneas

$Pe = 10.22$ nodos - $\Delta t = 100$ años. $L = 500$ m

∇ = actividad U^{234}

$\square$ = actividad Th^{230}

$\circ$ = actividad Ra^{226}

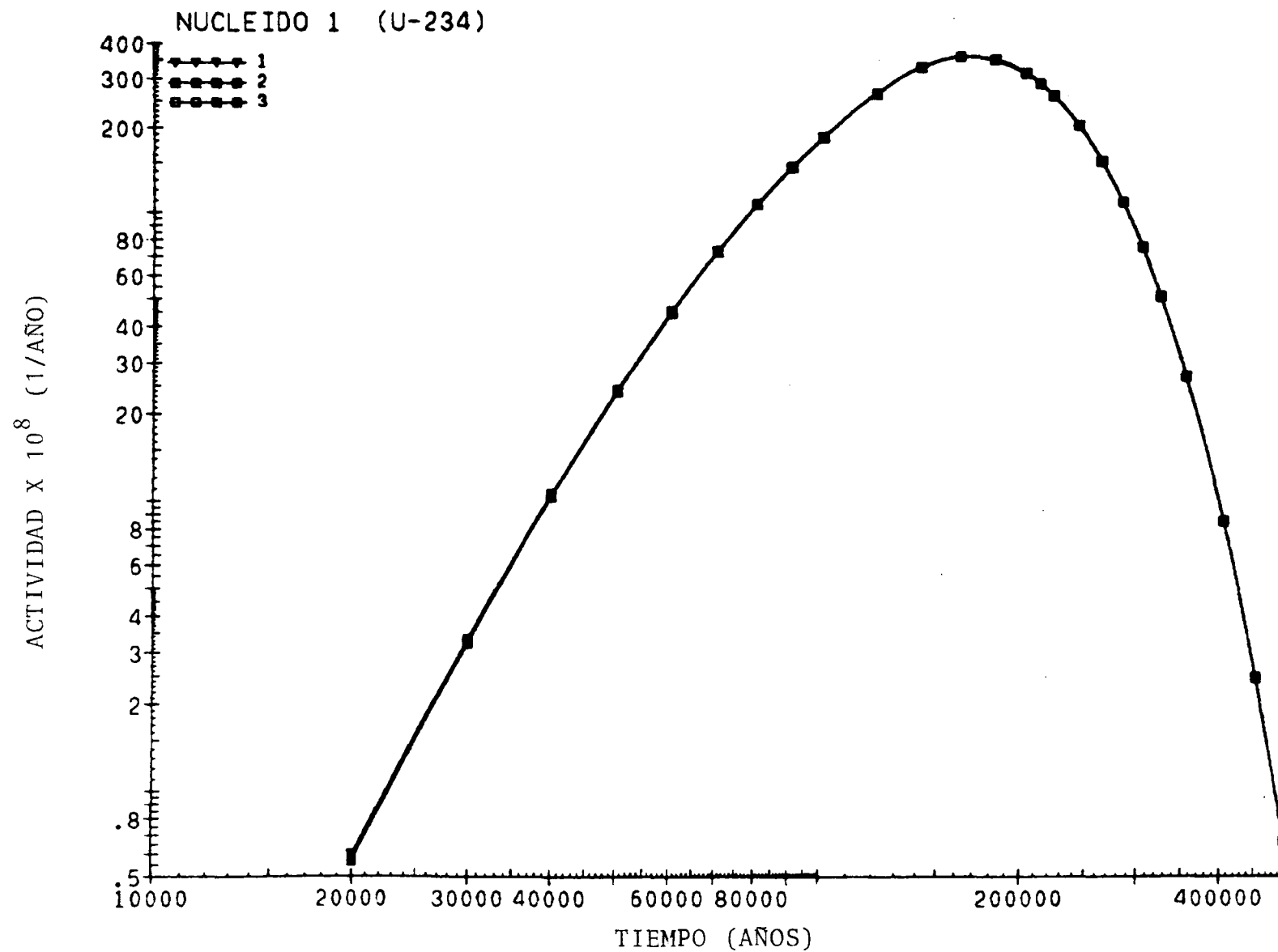


FIGURA 7 - Nucleido 1 (U^{234}) . Comparación de tres métodos numéricos
 $Pe = 10.22$ nodos - $L = 500$ m
 ∇ = método de las líneas. $\Delta t = 10000$ años
 $\square$ = método explícito. $\Delta t = 100$ años
 $\boxplus$ = método implícito. $\Delta t = 100$ años

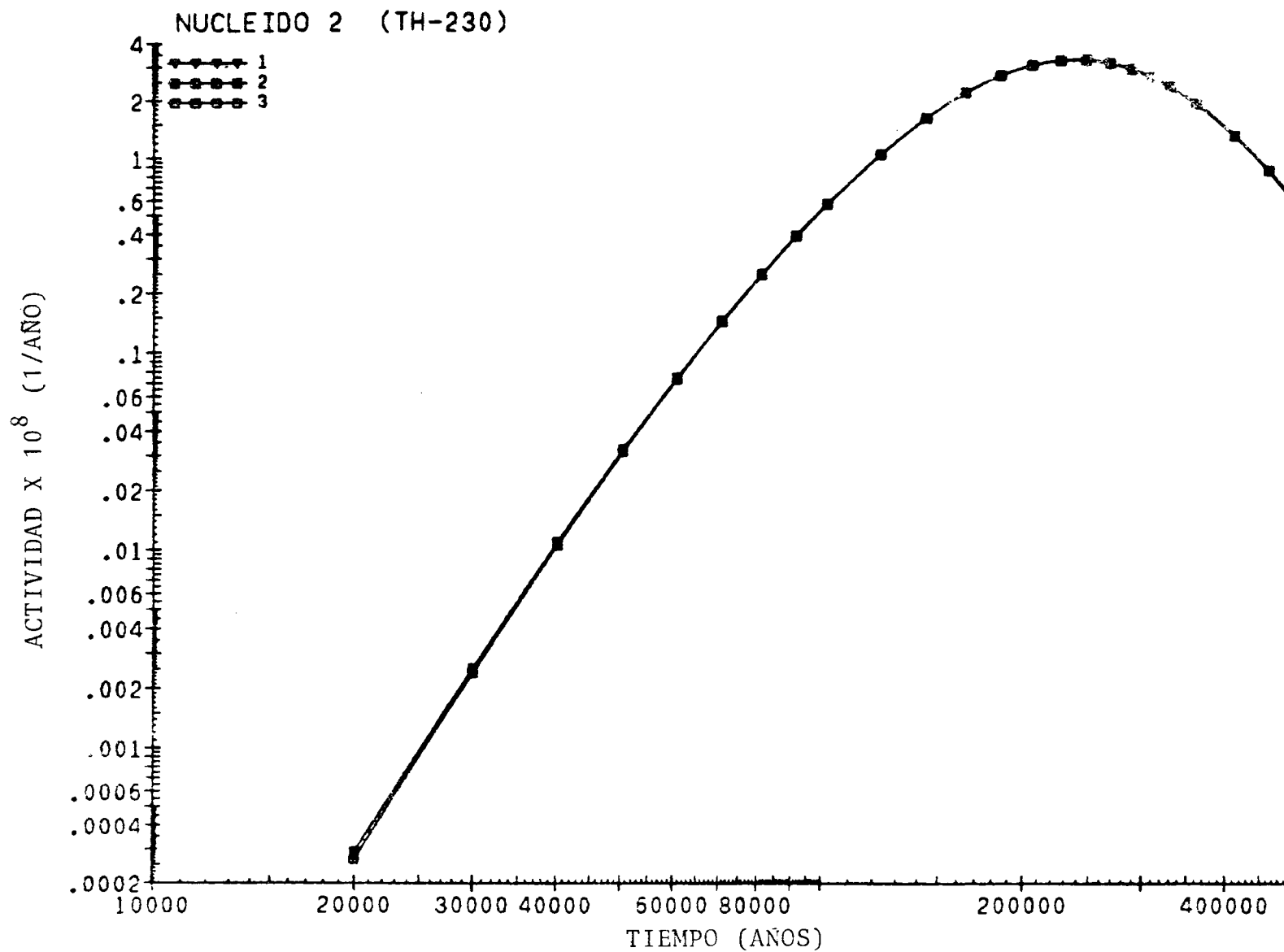


FIGURA 8 - Nucleido 2 (Th^{230}) . Comparación de tres métodos numéricos
 $Pe = 10.22$ nodos - $L = 500$ m
 $\circ$ = método de las líneas. $\Delta t = 10000$ años
 $\square$ = método explícito. $\Delta t = 100$ años
 $\triangle$ = método implícito. $\Delta t = 100$ años

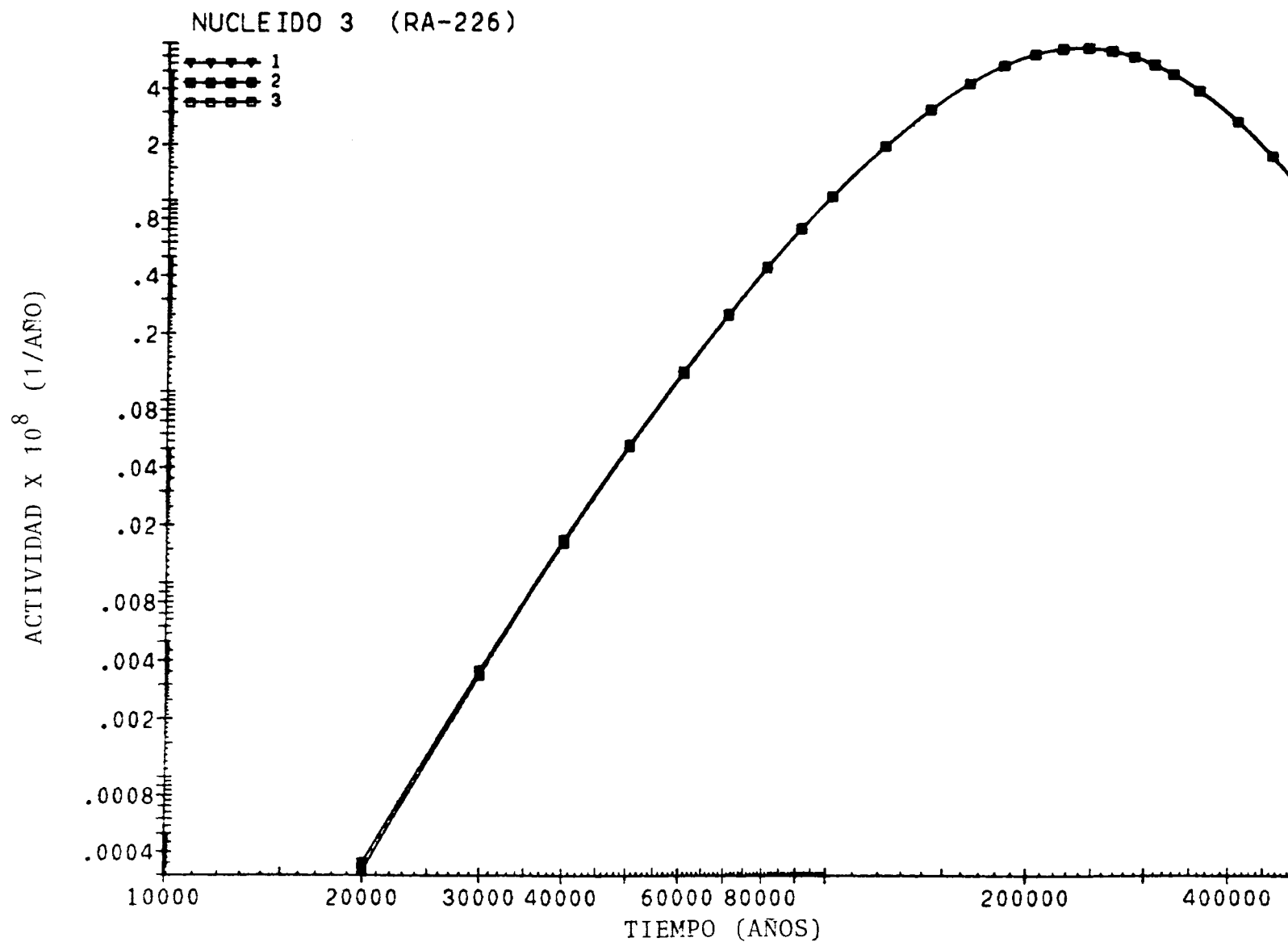


FIGURA 9 - Nucleido 3 (Ra^{226}) . Comparación de tres métodos numéricos
 $Pe = 10.22$ nodos . $L = 500$ m
 ∇ = método de las líneas. $\Delta t = 10000$ años
 $\square$ = método explícito. $\Delta t = 100$ años
 $\equiv$ = método implícito. $\Delta t = 100$ años

NUCLIDE 1

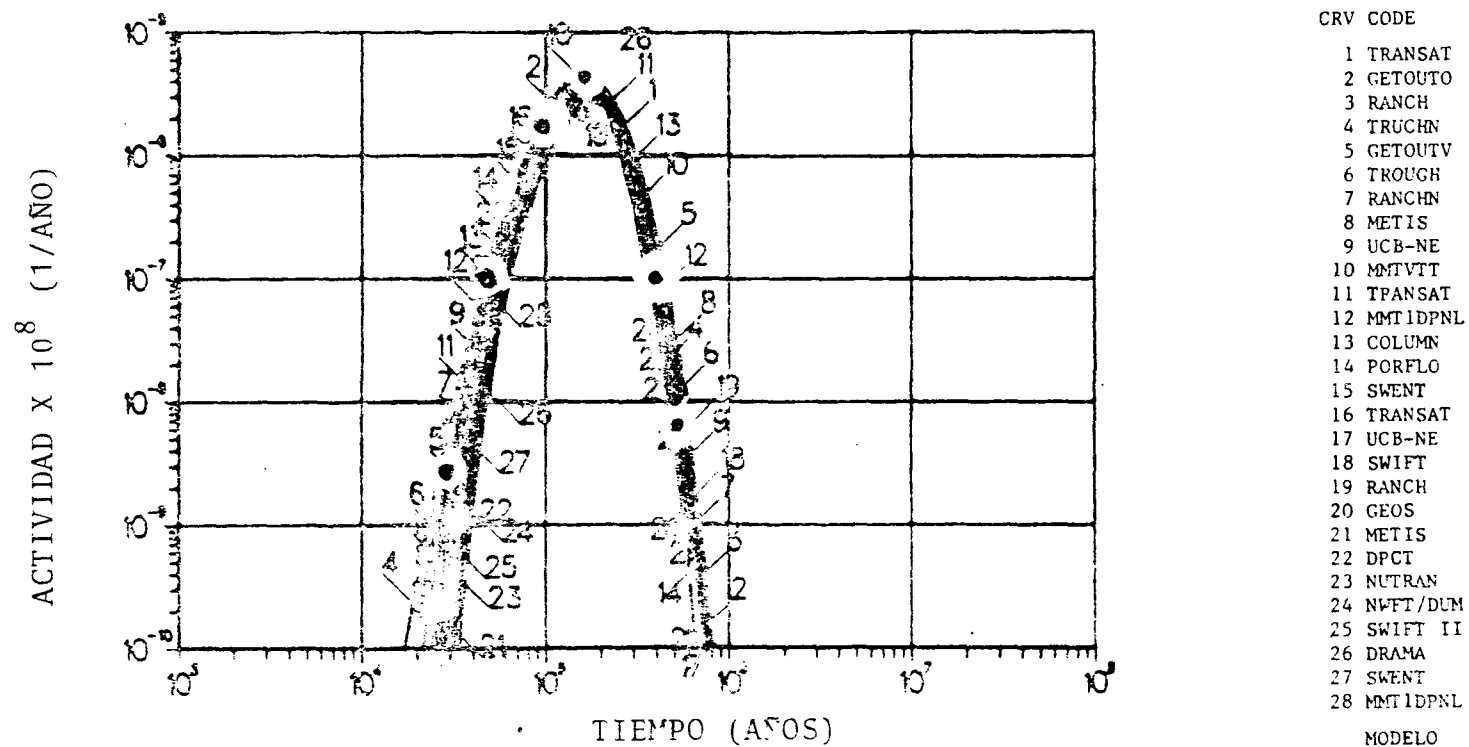


Figura 10 - Nucleido 1 (U^{234})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACOIN /9/
 $Pe = 10 - 22$ nodos

NUCLIDE 2

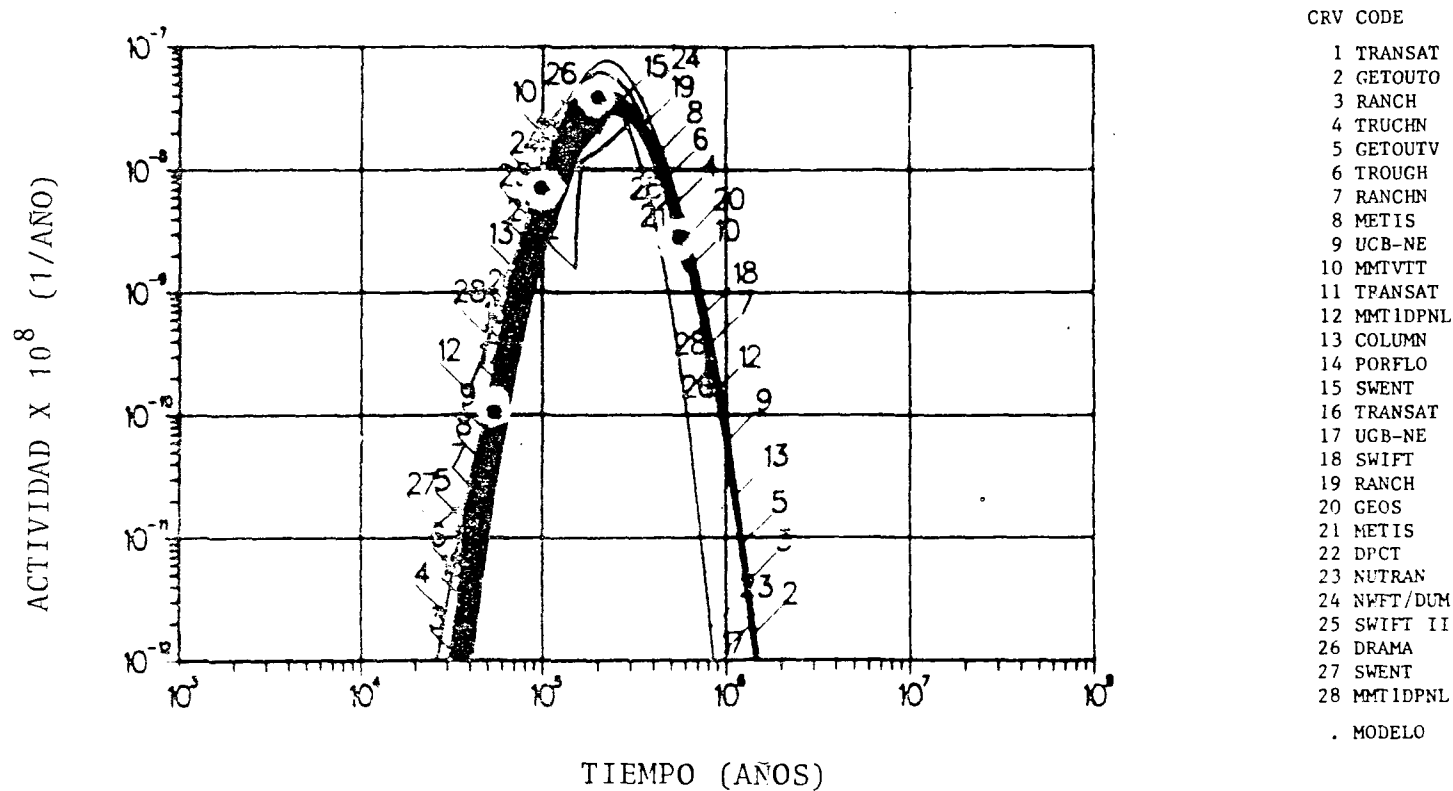


Figura 11 - Nucleido 2 (Th^{230})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACOIN /9/
 $P_e = 10 - 22$ nodos

NUCLIDE 3

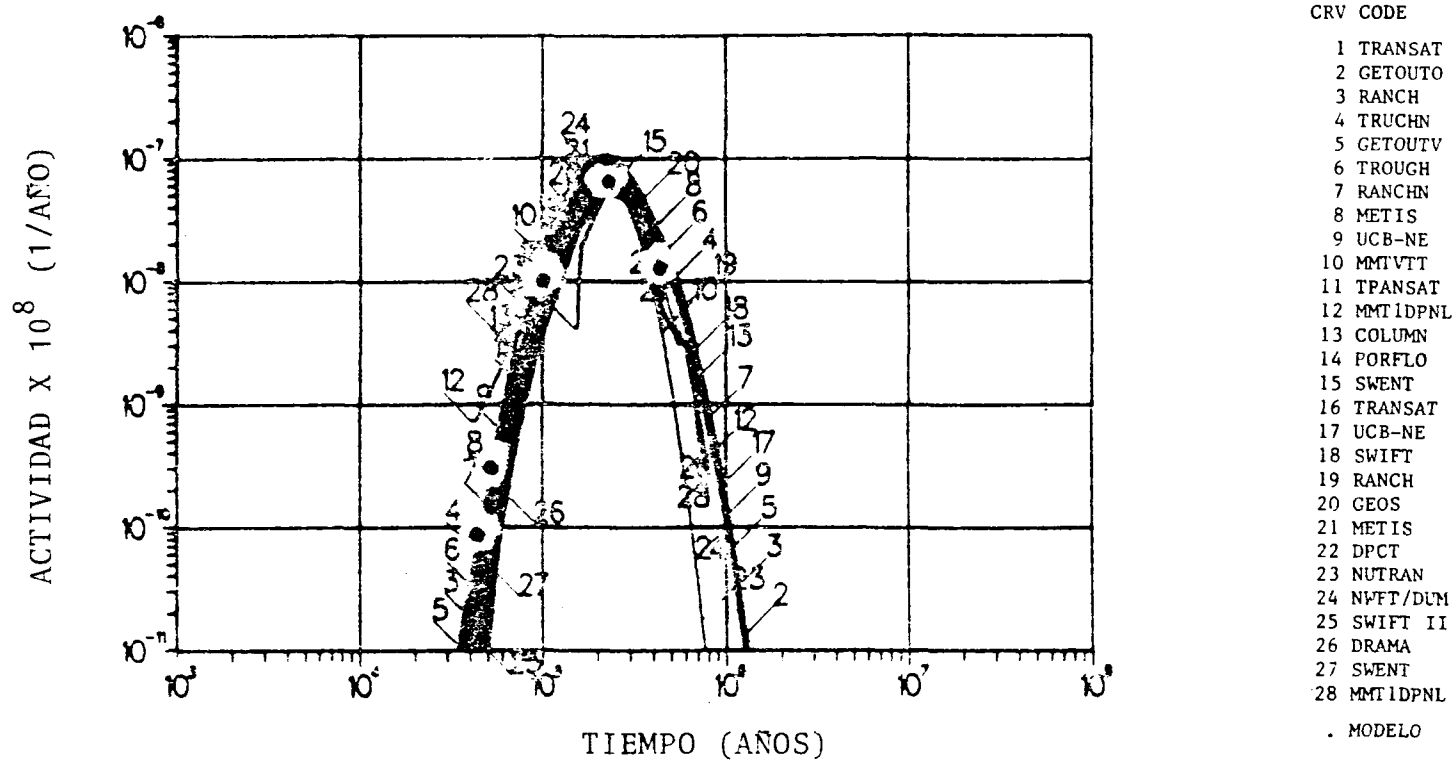


Figura 12 - Nucleido 3 (Ra^{226})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACOIN /9/
 $Pe = 10 - 22$ nodos

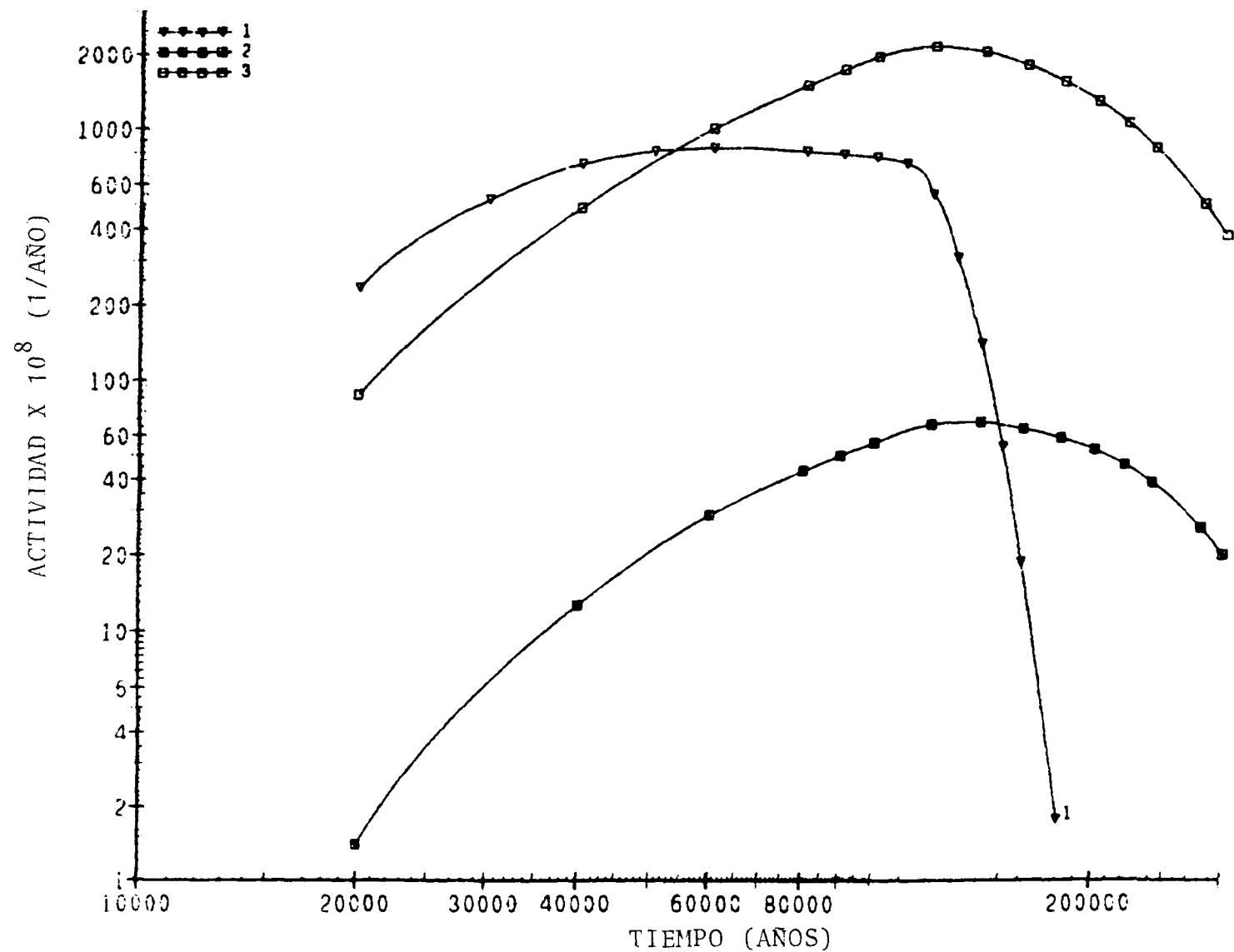


FIGURA 13 - Ejemplo 2. Caso 2
 Pe 10.22 nodos. $\Delta t = 100$ años. $L = 500$ m
 ∇ = actividad U^{234}
 $\square$ = actividad h^{230}
 $\circ$ = actividad Ra^{226}

NUCLIDE 1

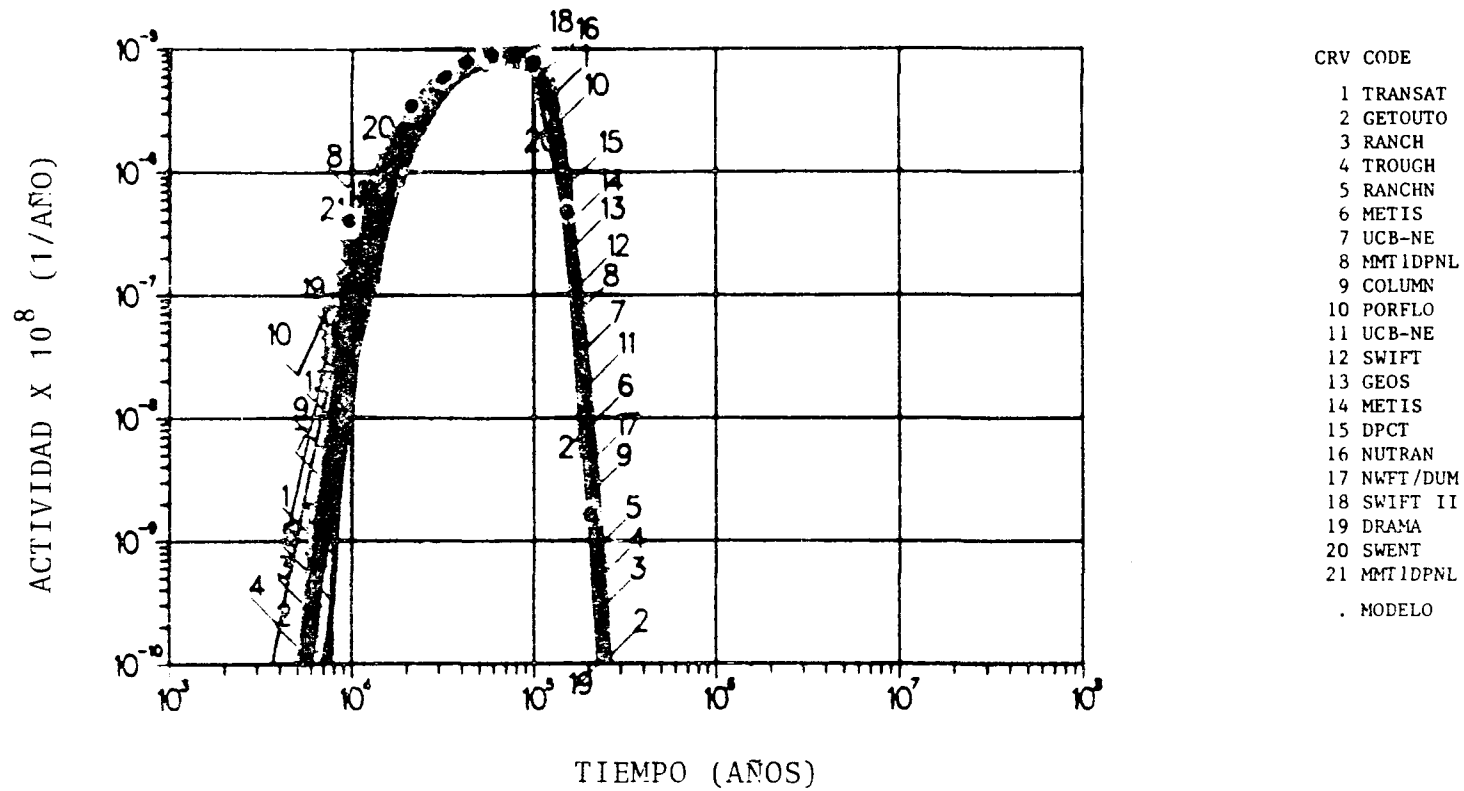


Figura 14 - Nucleido 1 (U^{234})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACOIN /9/
 Pe = 10 - 22 nodos

NUCLIDE 2

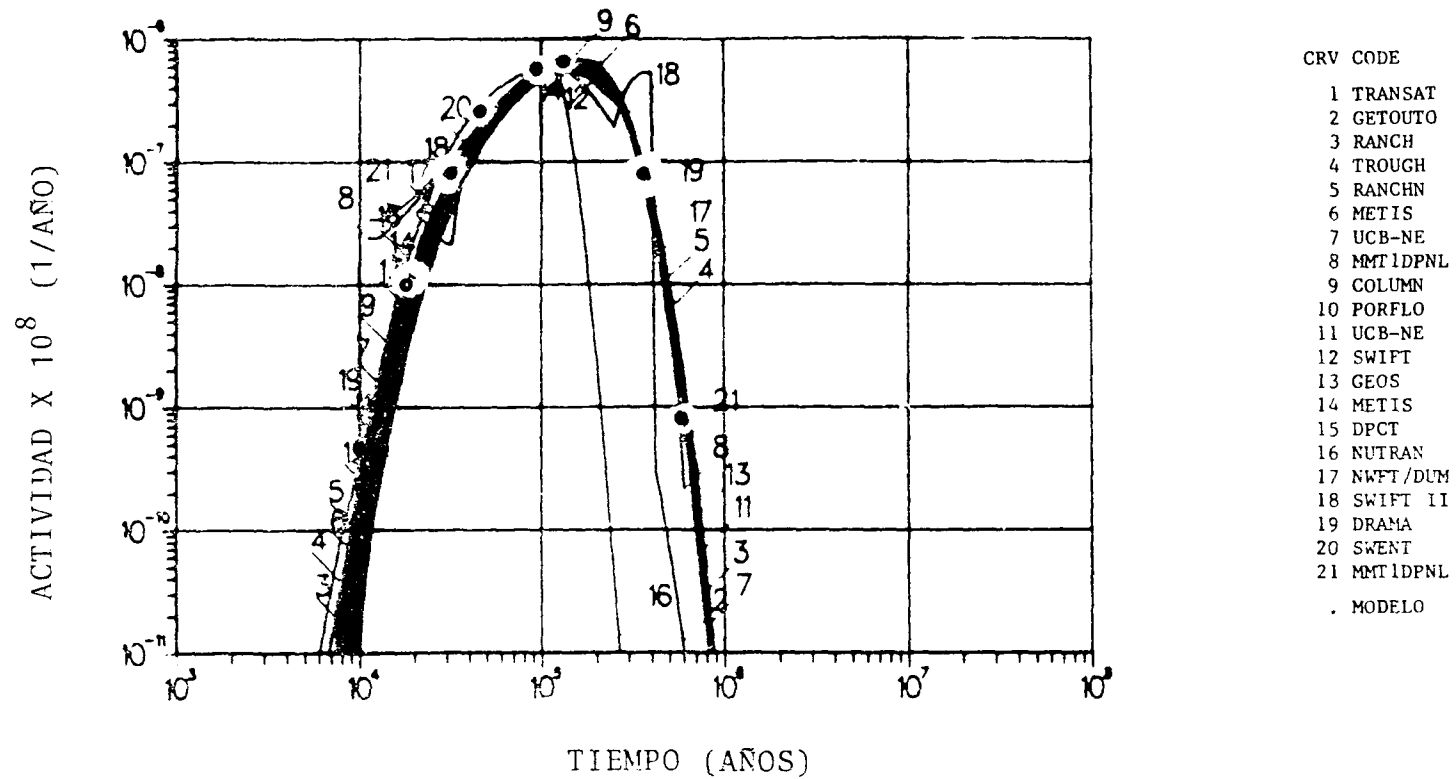


Figura 15 - Nucleido 2 (Th^{230})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 Pe = 10 - 22 nodos

NUCLIDE 3

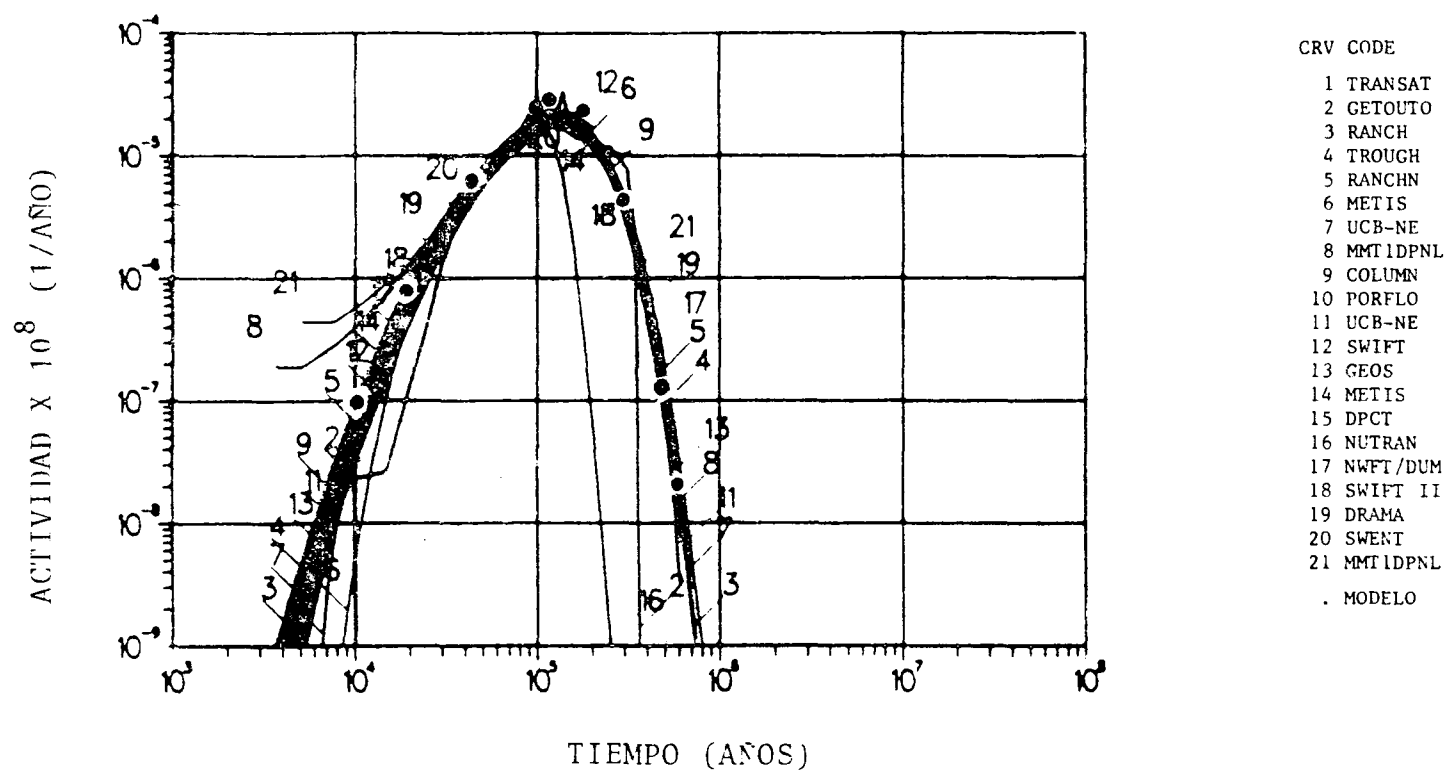


Figura 16 - Nucleido 3 (Ra^{226})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACOIN /9/
 Pe = 10 - 22 nodos

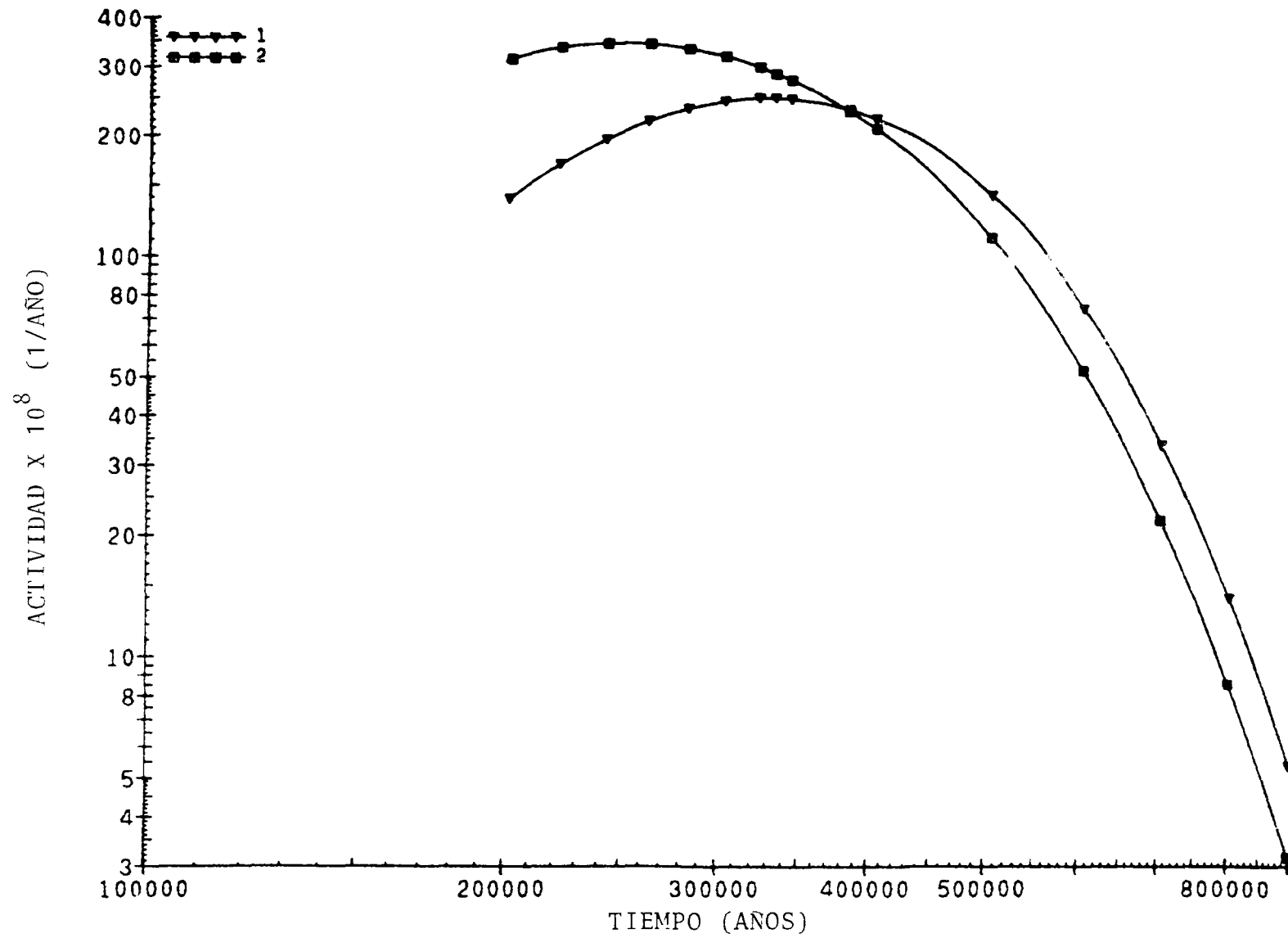
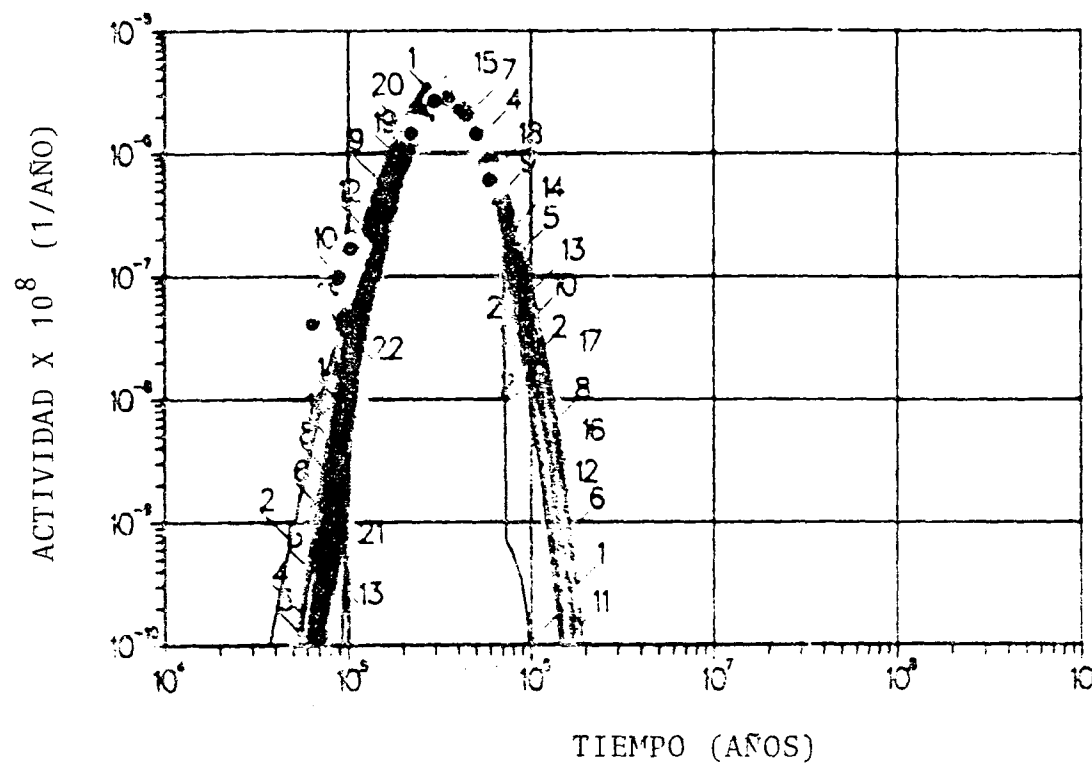


FIGURA 17 - Ejemplo 2 - Caso 3
 Pe 10.22 nodos - $\Delta t = 100$ años. $L = 500$ m
 ∇ = Actividad Np^{231}
 $\square$ = actividad U^{233}

NUCLIDE 2



CRV CODE	
1	GETOUTO
2	TRUCHN
3	GETOUTV
4	TROUGH
5	RANCHN
6	RANCH
7	METIS
8	UCB-NE
9	MMIVTT
10	MMTIDPNL
11	COLUMN
12	PORFLO
13	UCB-NE
14	SWIFT
15	METIS
16	GEOS
17	NUTRAN
18	NWFI/DVM
19	SWIFT II
20	DRAMA
21	SWENT
22	MMTIDPNL
.	MODELO

Figura 18 - Nucleido 2 (Np^{231})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 Pe = 10 - 22 nodos

NUCLIDE 3

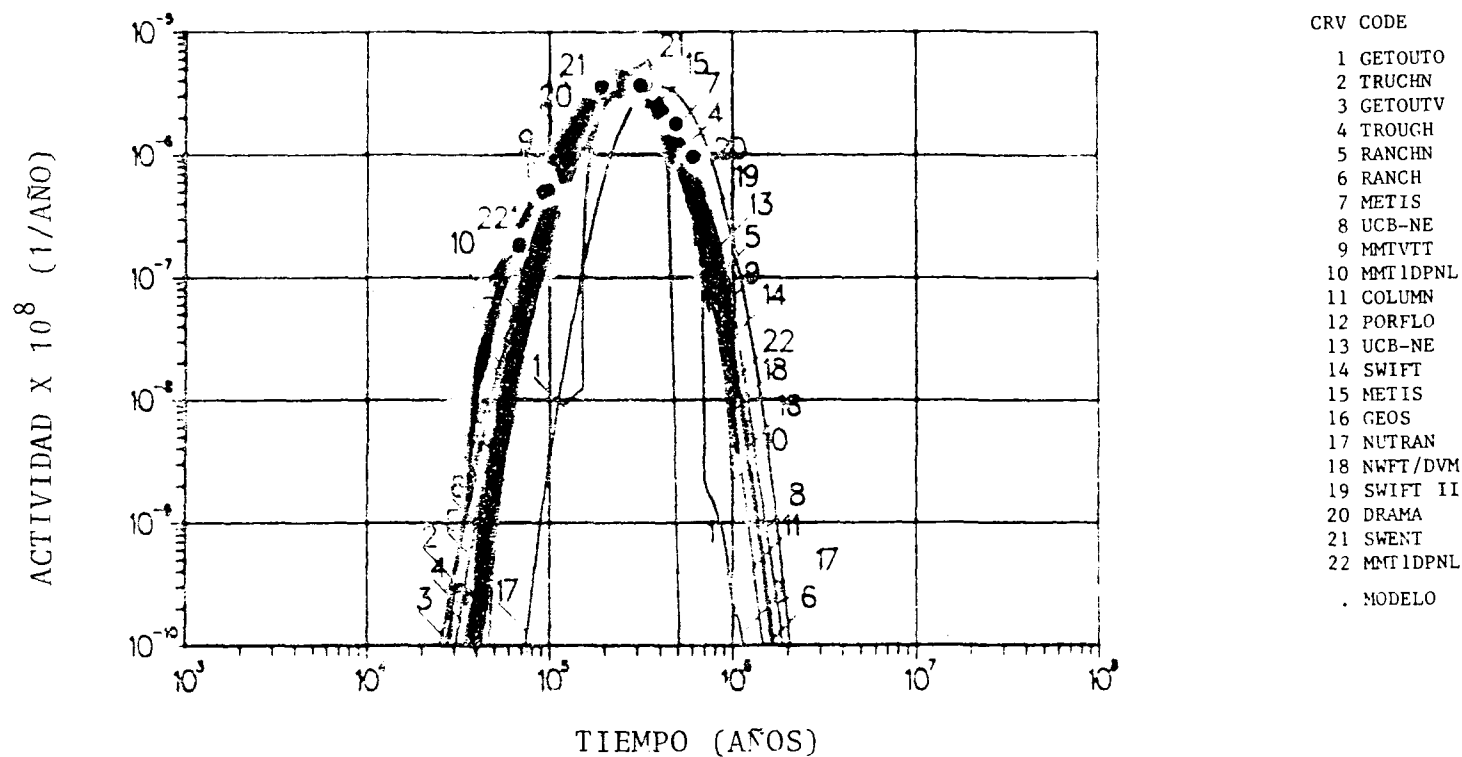


Figura 19 - Nucleido 3 (U^{233})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACOIN /9/
 Pe = 10 - 22 nodos

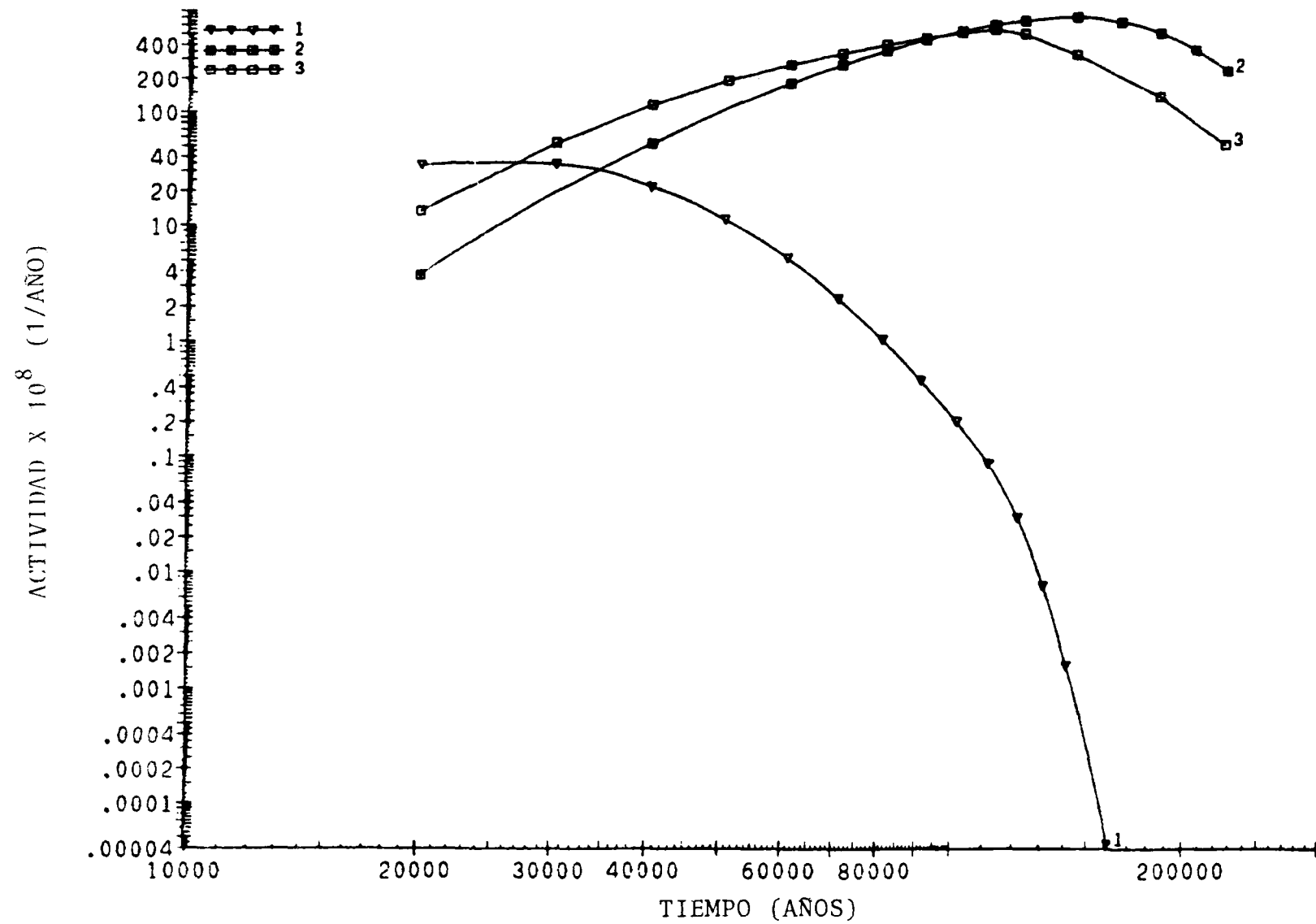


FIGURA 20 - EJEMPLO 2 - Caso 4
 $Pe = 10.22$ nodos - $\Delta t = 100$ años. $L = 500$ m
 ∇ = actividad Cm^{245}
 $\blacksquare$ = actividad Np^{231}
 $\square$ = actividad U^{233}

NUCLIDE 1

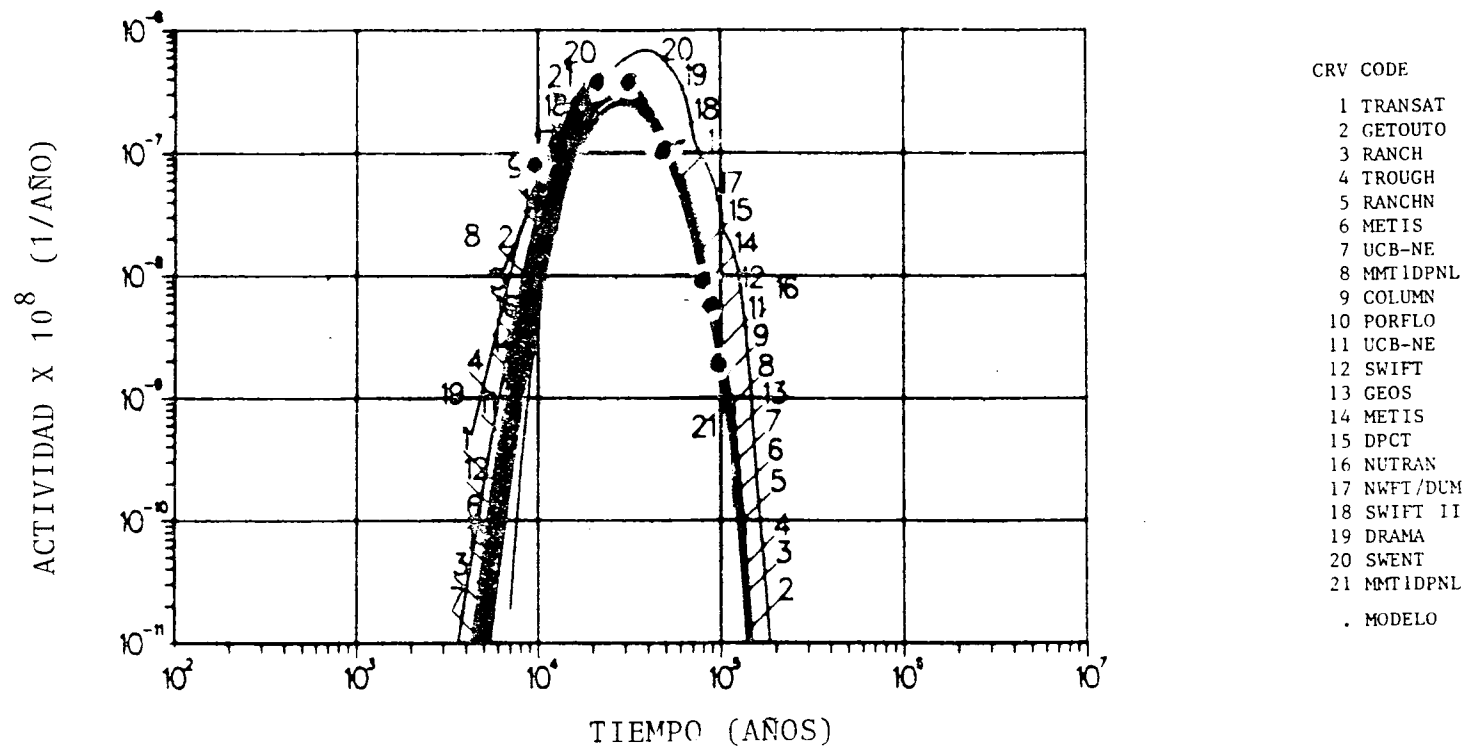


Figura 21 - Nucleido 1 (Cm^{245})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACOIN /9/
 $P_e = 10 - 22$ nodos

NUCLIDE 2

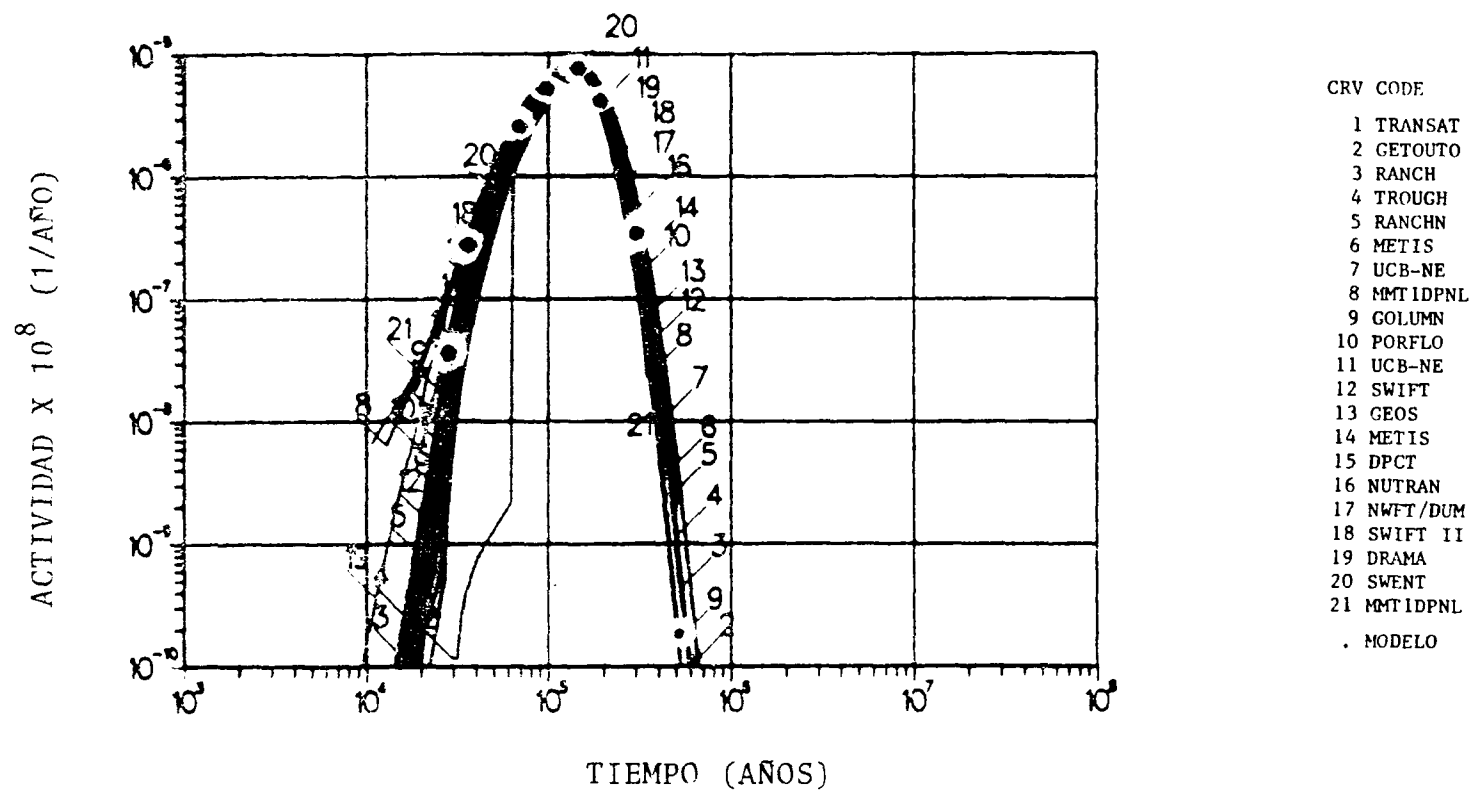


Figura 22 - Nucleido 2 (Np^{231})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 $P_e = 10 - 22$ nodos

NUCLIDE 3

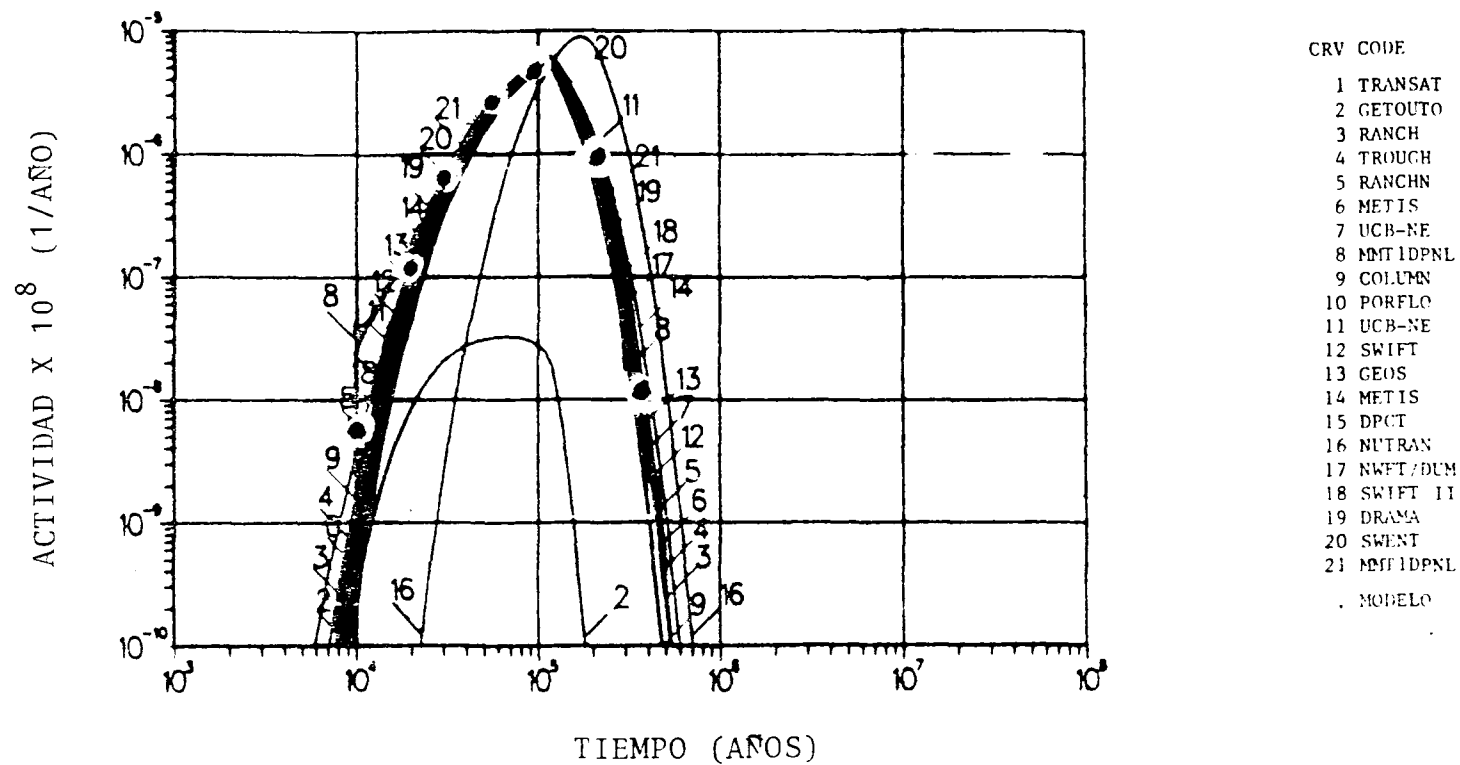


Figura 23 - Nucleido 3 ($I1^{233}$)
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACOIN /9/
 $P_e = 10 - 22$ nodos

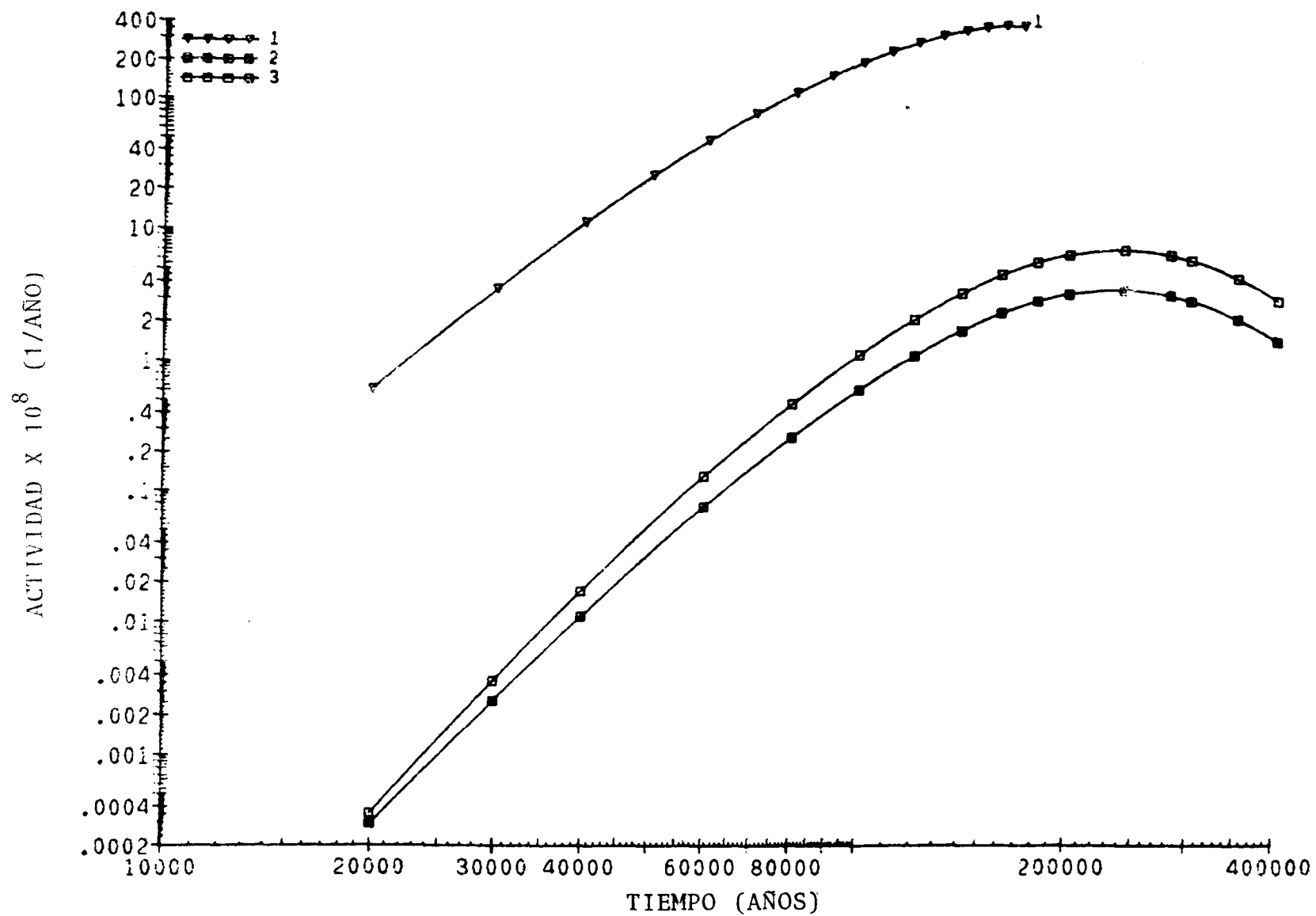


FIGURA 24 - EJEMPLO 3 - Caso 1

$Pe = 10.22$ nodos, $\Delta t = 100$ años, $L = 500$ m

∇ = actividad U_{234}

$\blacksquare$ = actividad Th^{230}

$\square$ = actividad Ra^{226}

NUCLIDE 1

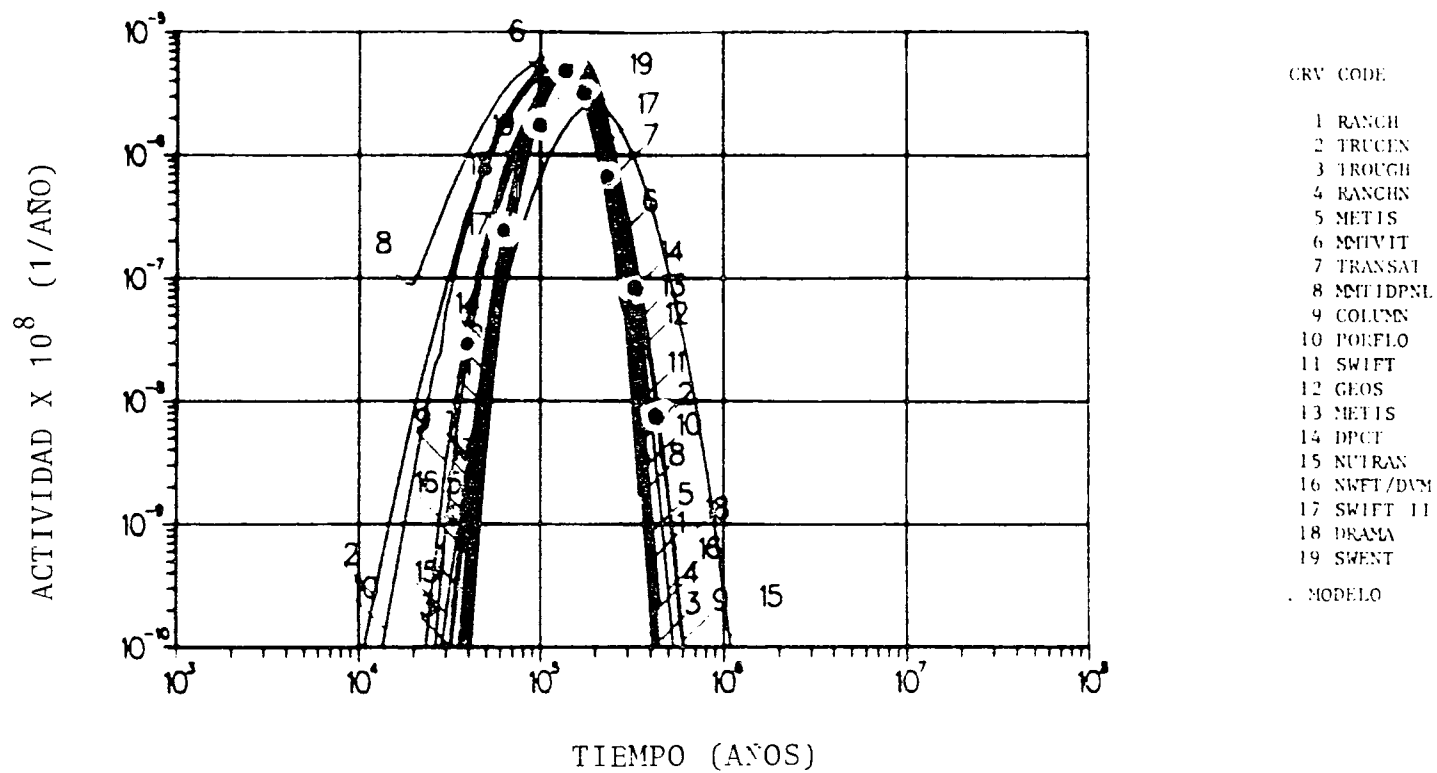


Figura 25 - Nucleido 1 (U^{234})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 Pe = 10 - 22 nodos

NUCLIDE 2

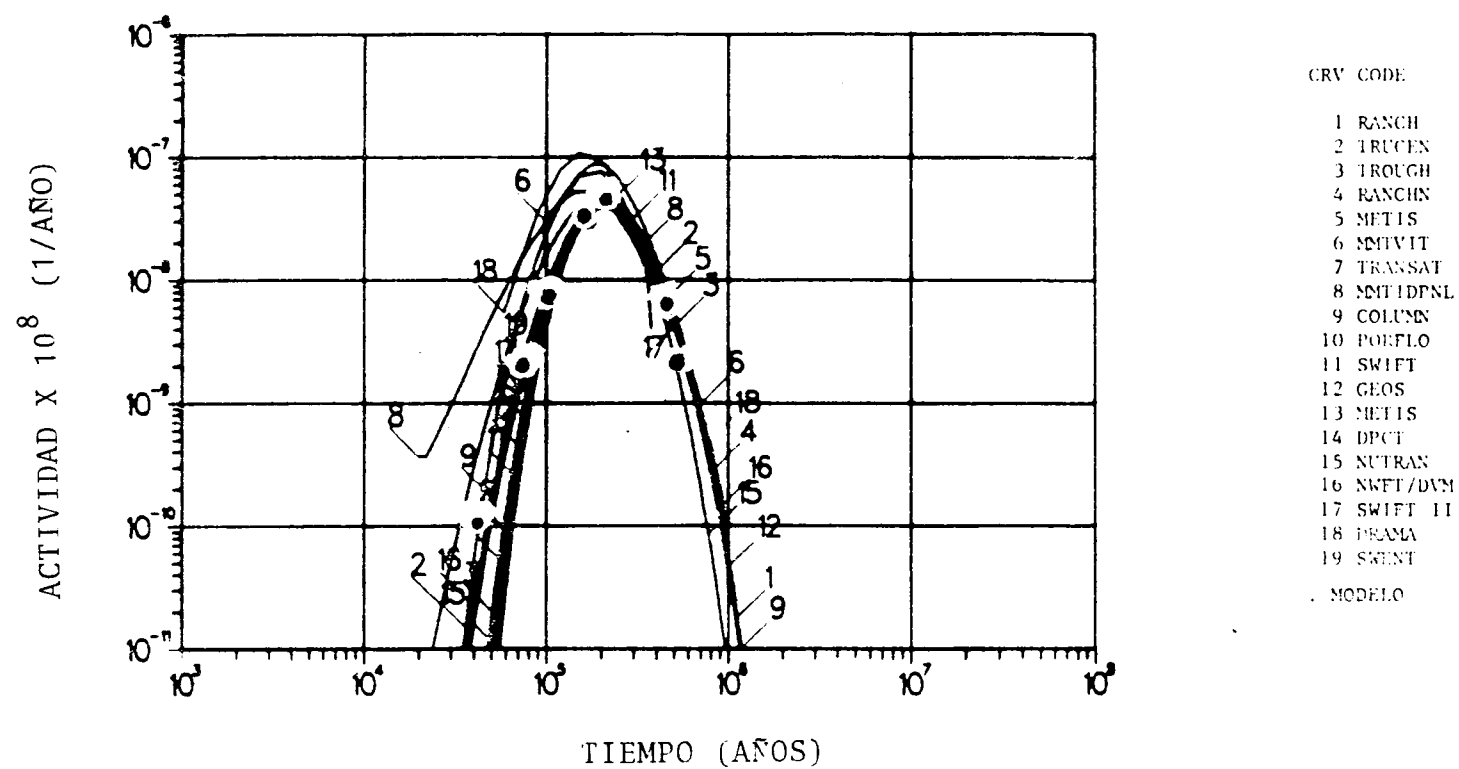


Figura 26 - Nucleido 2 (Th^{230})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACOIN /9/
 Pe = 10 - 22 nodos

NUCLIDE 3

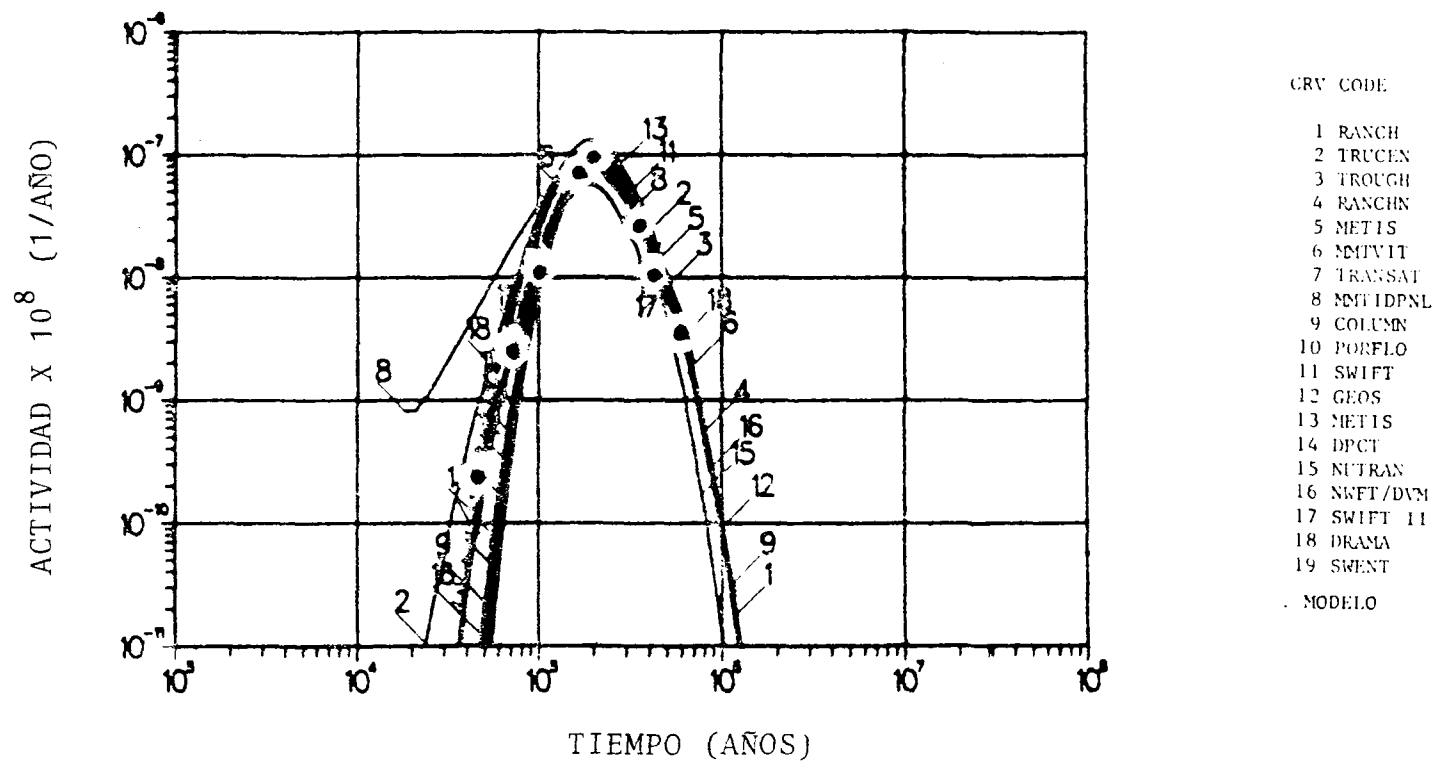


Figura 27 - Nucleido 3 (Ra^{226})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 Pe = 10 - 22 nodos

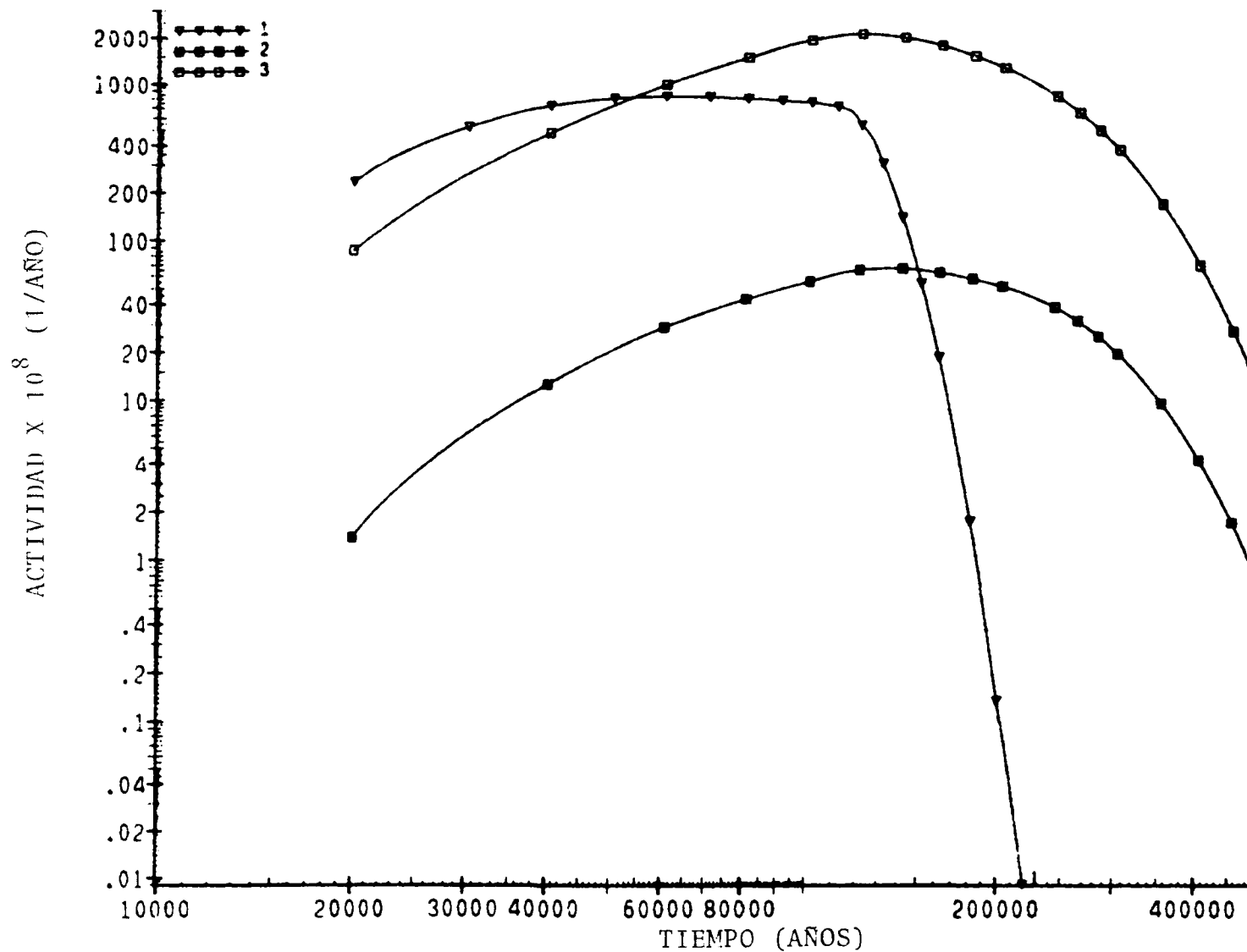


FIGURA 28 - Ejemplo 3 - Caso 2
 $Pe = 10.22$ nodos - $\Delta t = 100$ años. $L = 500$ años
 ∇ = actividad U^{234}
 $\square$ = actividad Th^{230}
 $\circ$ = actividad Ra^{226}

NUCLIDE 1

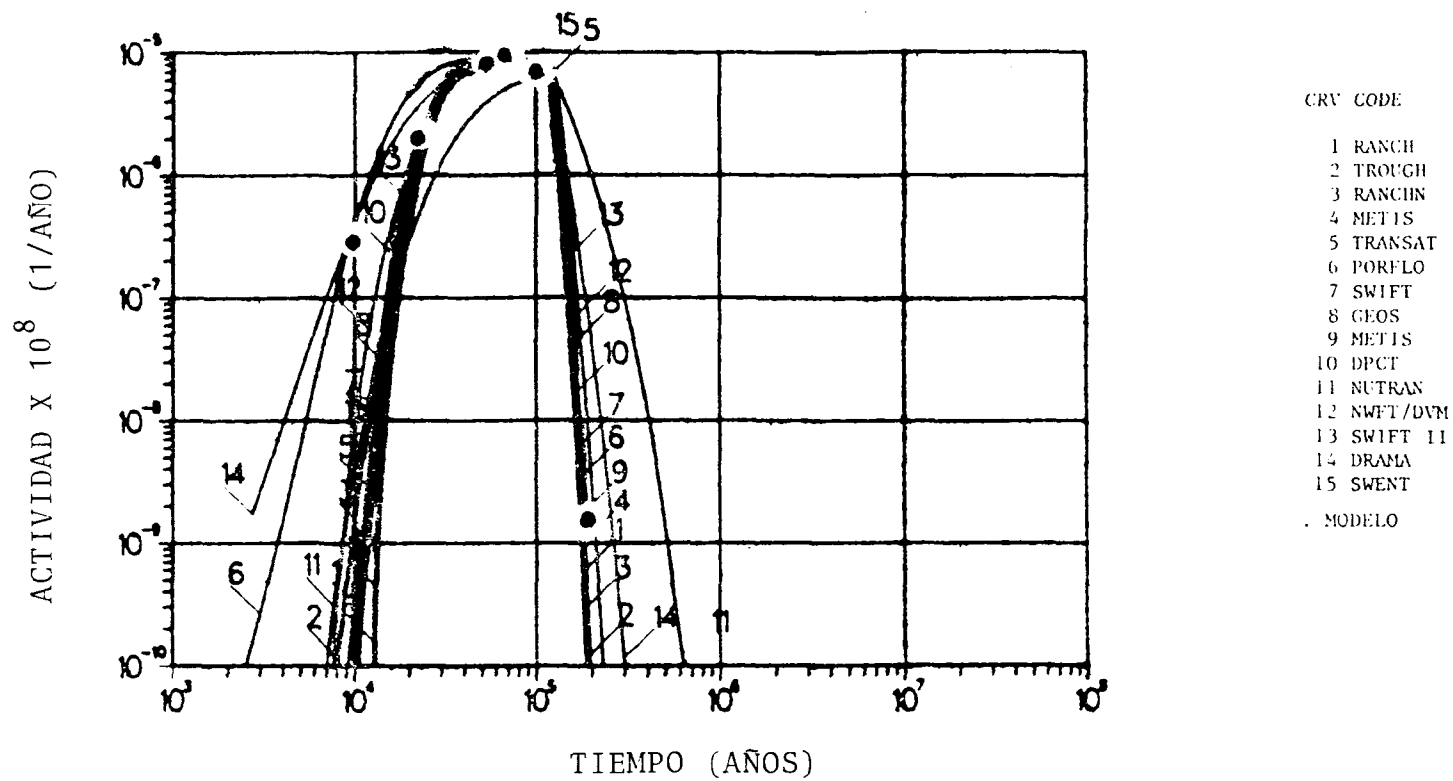


Figura 29 - Nucleido 1 (U^{234})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 Pe = 10 - 22 nodos

NUCLIDE 2

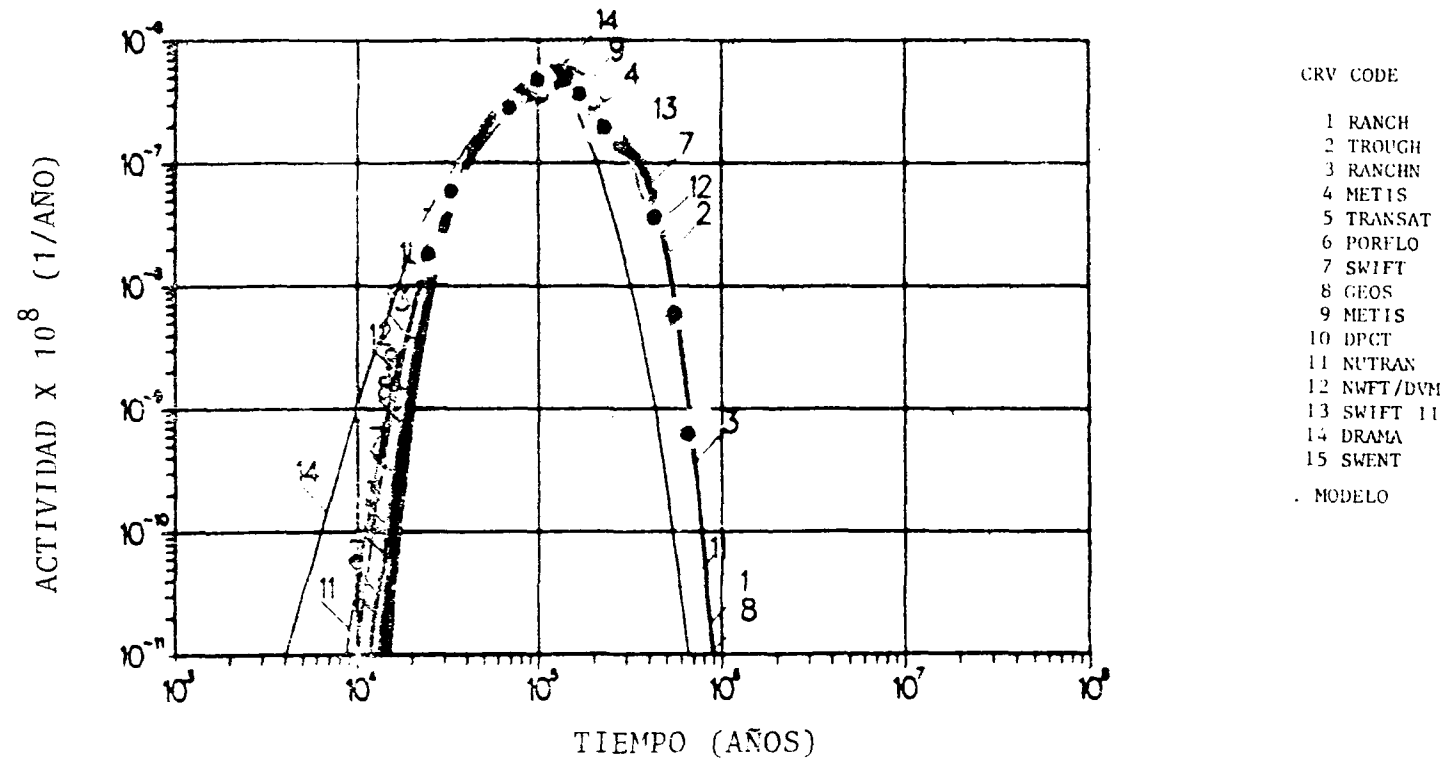


Figura 30 - Nucleido 2 (Th^{230})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 $P_e = 10 - 22$ nodos

NUCLIDE 3

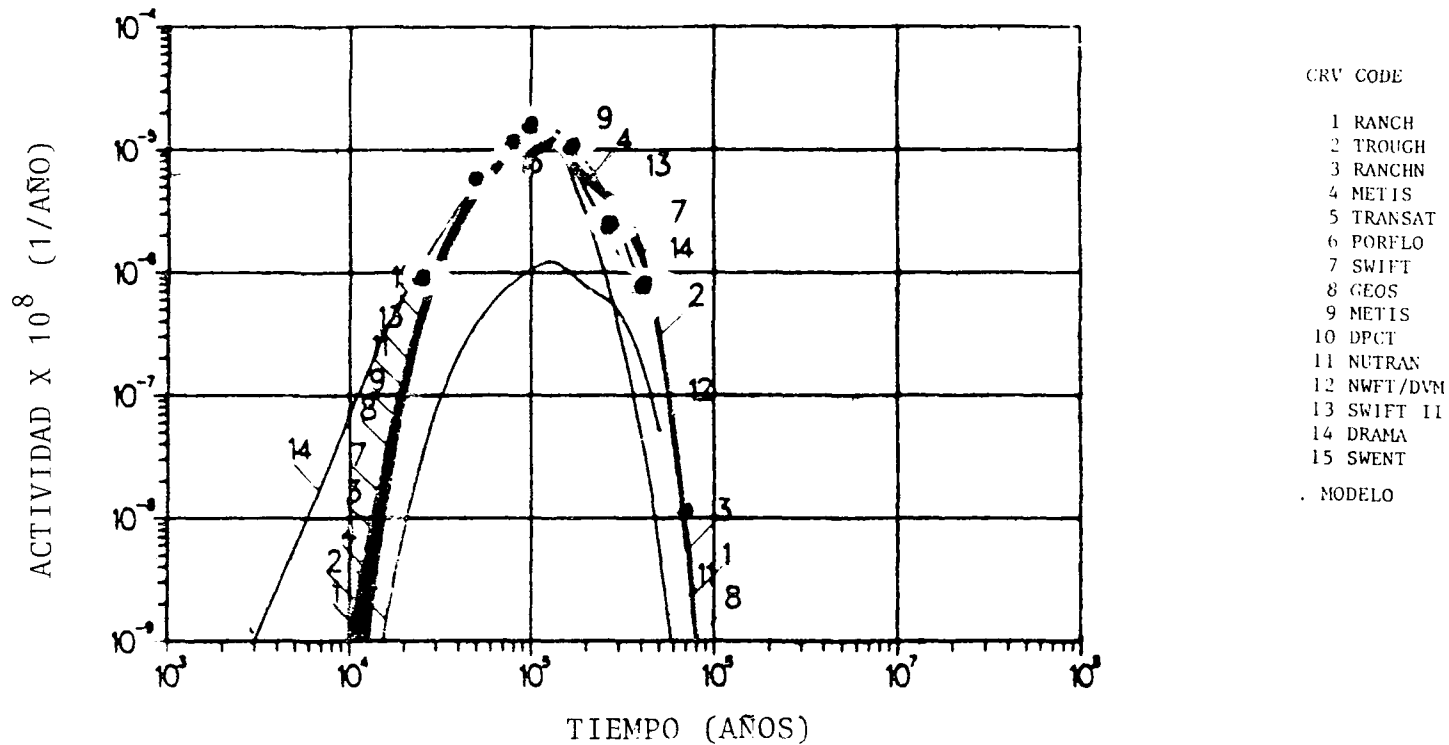


Figura 31 - Nucleido 3 (Ra^{226})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 Pe = 10 - 22 nodos

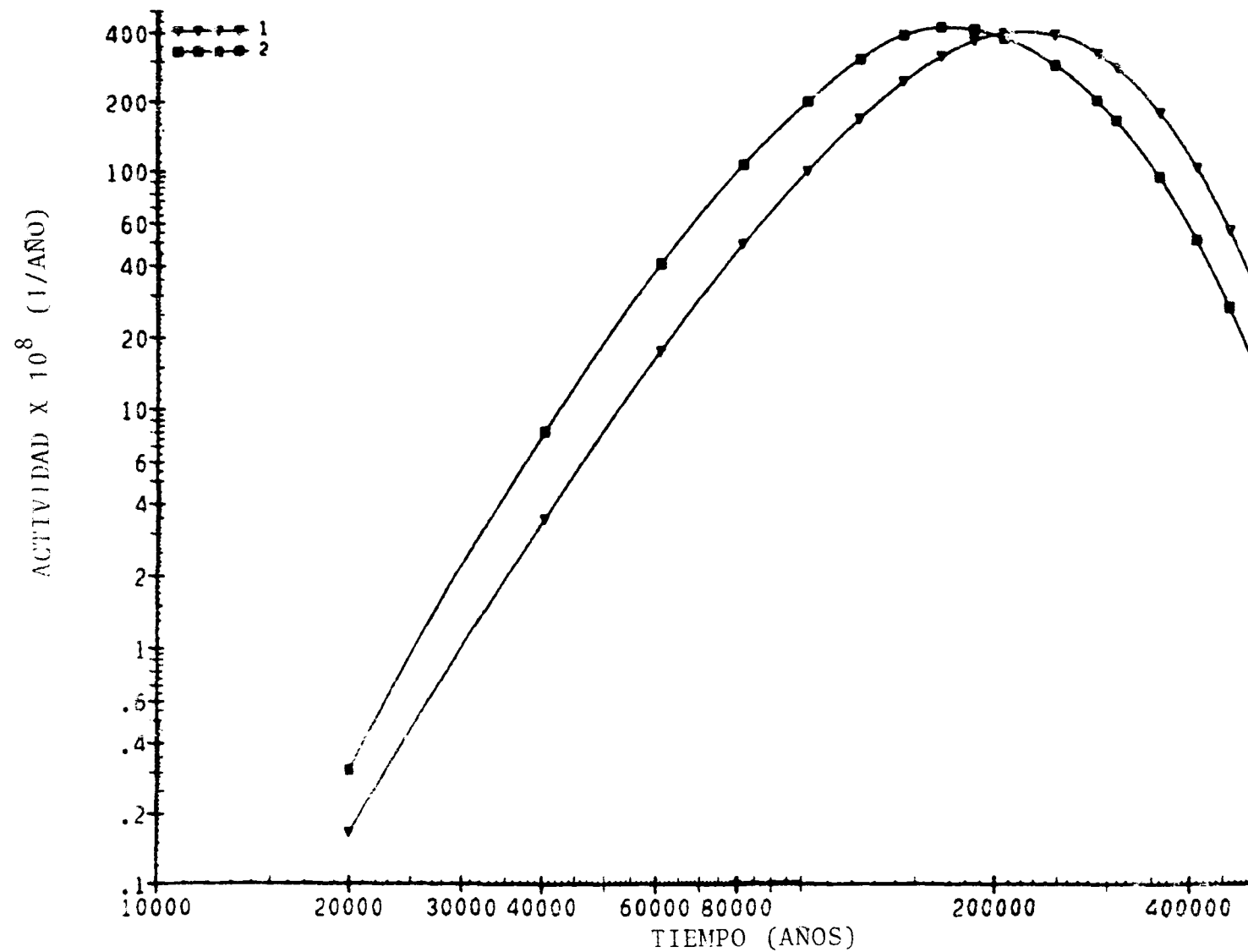


FIGURA 32 - EJEMPLO 3 - Caso 3
 $Pe = 10.22$ nodos, $\Delta t = 100$ años, $L = 500$ m
 Δ = actividad Np^{231}
 $\blacksquare$ = actividad U^{233}

NUCLIDE 2

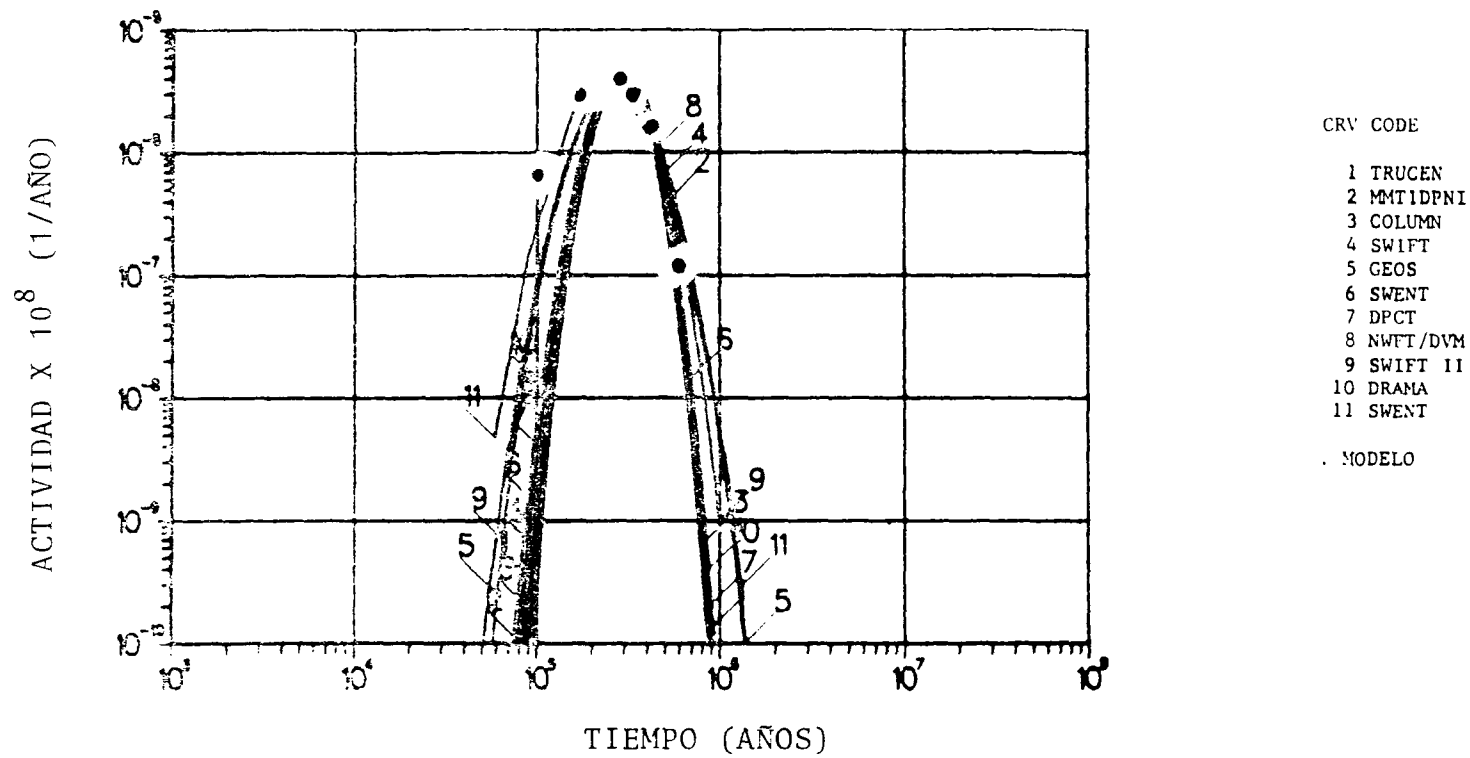


Figura 33 - Nucleido 2 (Np^{231})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 Pe = 10 - 42 nodos

NUCLIDE 3

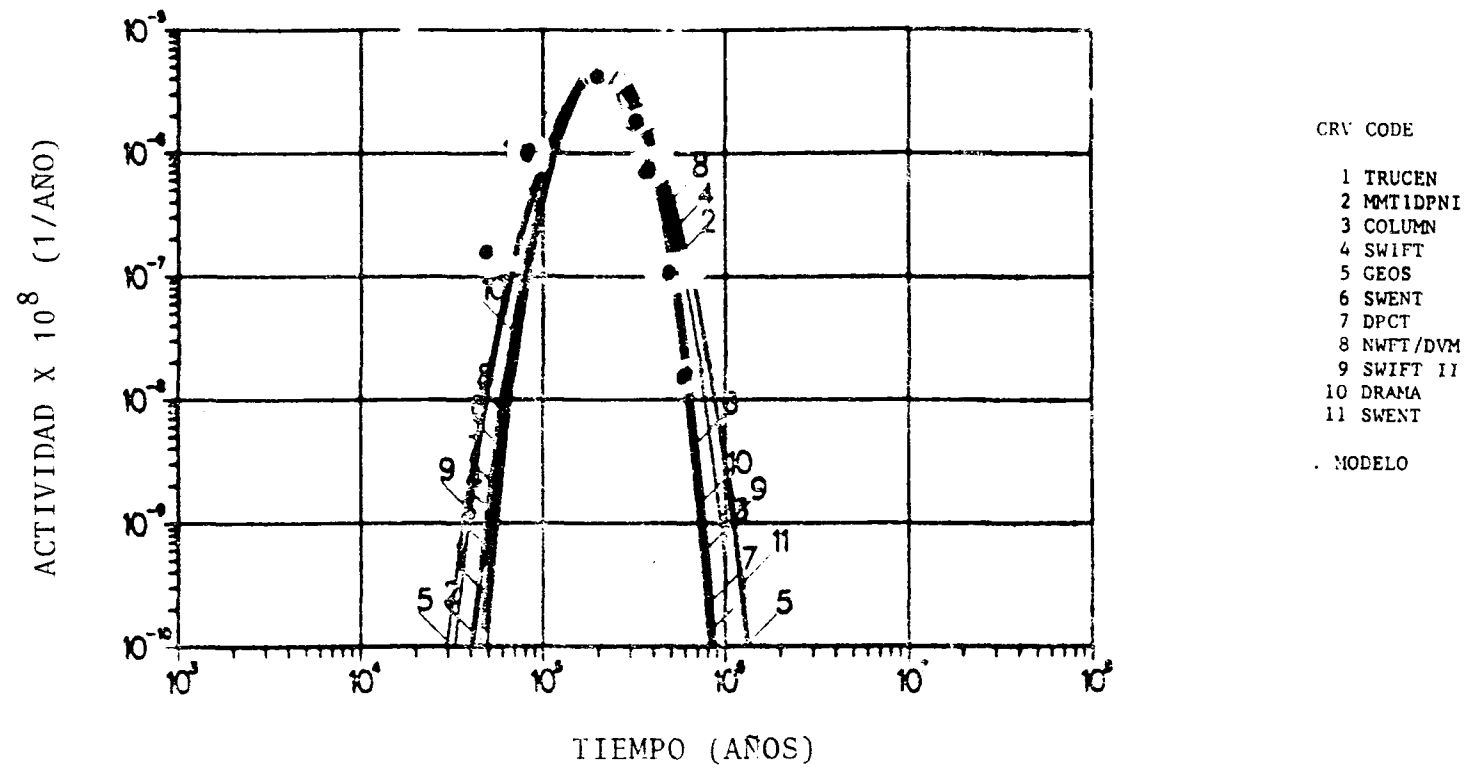


Figura 34 - Nucleido 3 (U^{233})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 $Pe = 10 - 42$ nodos

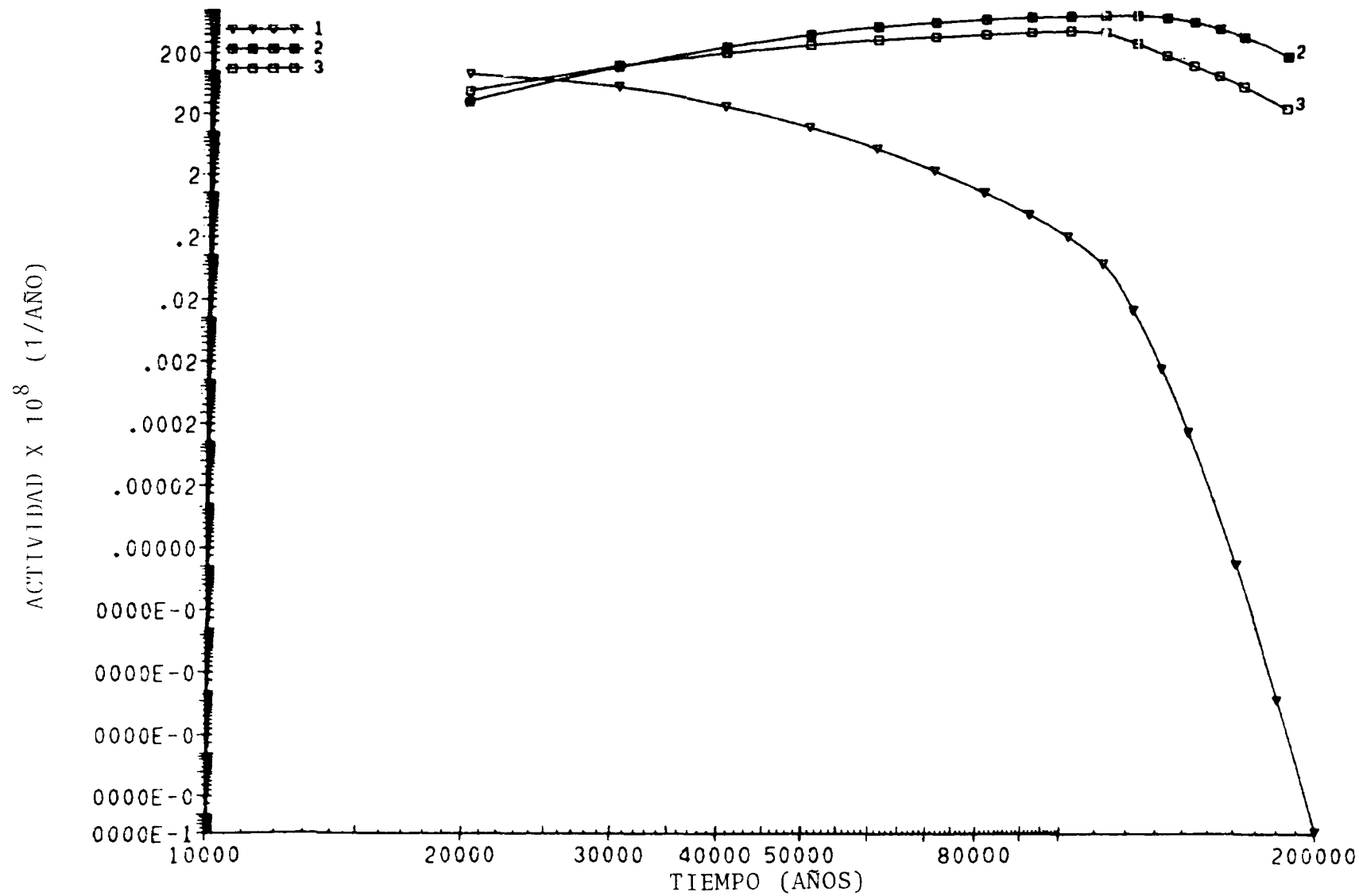


FIGURA 35 - EJEMPLO 3. Caso 4
 $Pe = 10.22$ nodos. $\Delta t = 100$ años. $L = 500$ m
 ∇ = actividad Cm^{245}
 $\square$ = actividad Np^{231}
 $\circ$ = actividad U^{233}

NUCLIDE 1

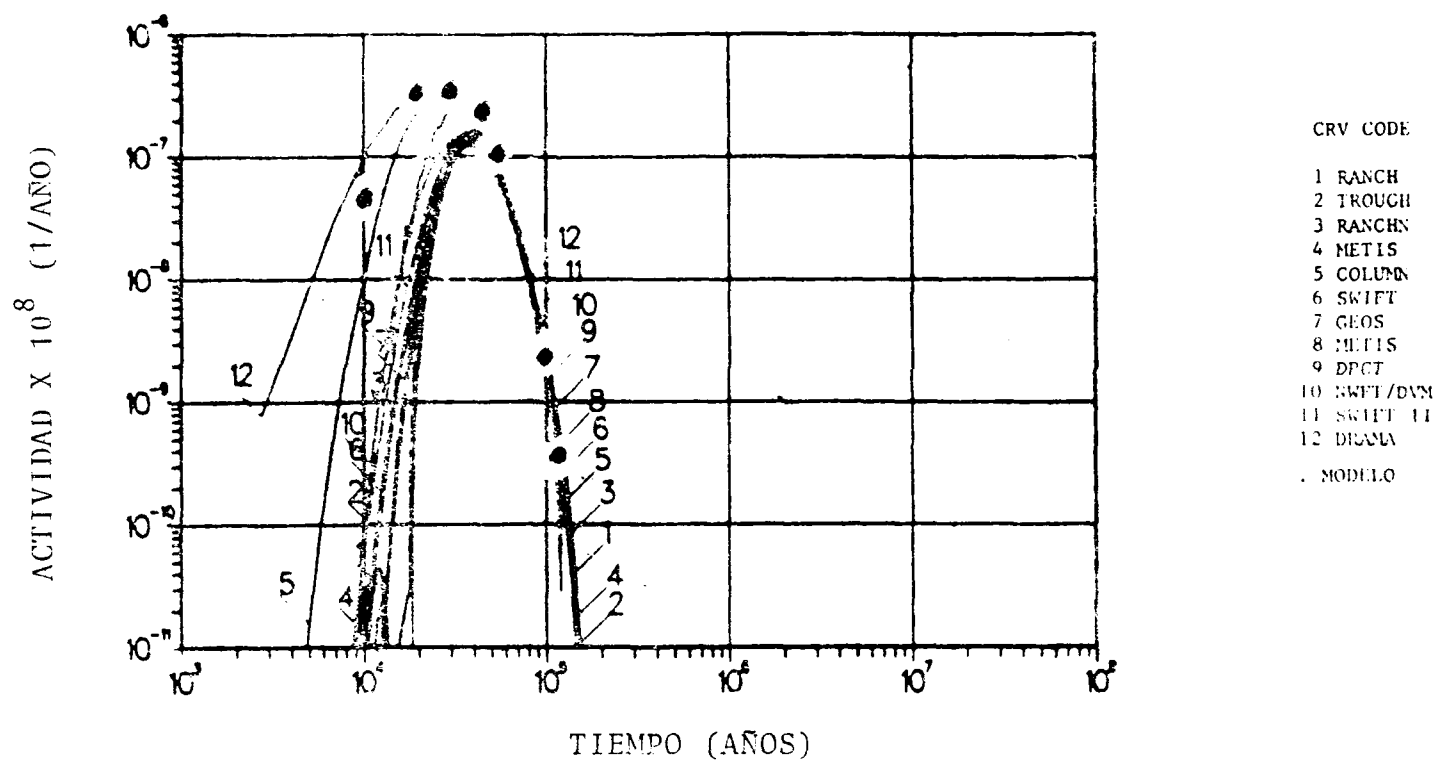


Figura 36 - Nucleido 1 (Cm^{245})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 Pe = 10 - 42 nodos

NUCLIDE 2

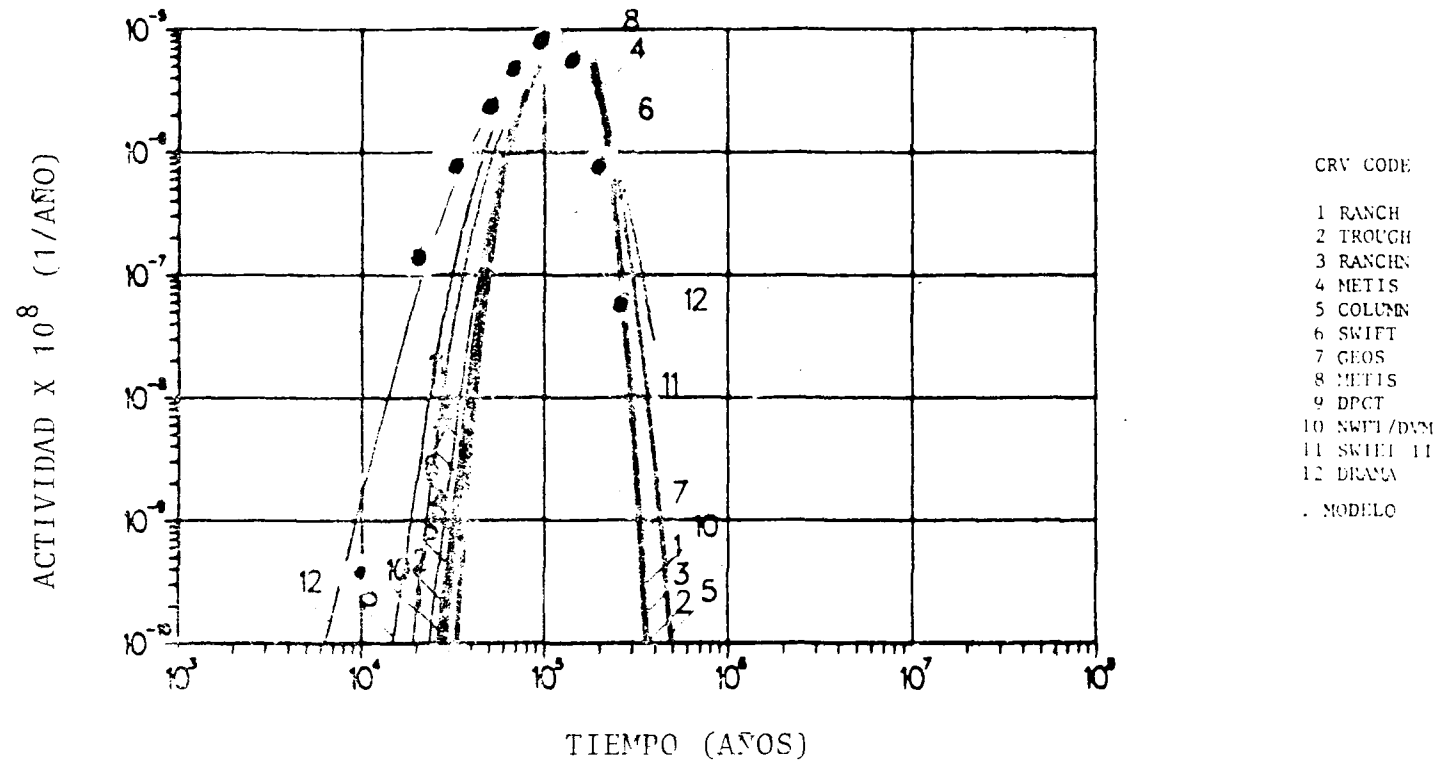


Figura 37 - Nucleido 2 (Np^{231})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 Pe = 10 - 42 nodos

NUCLIDE 3

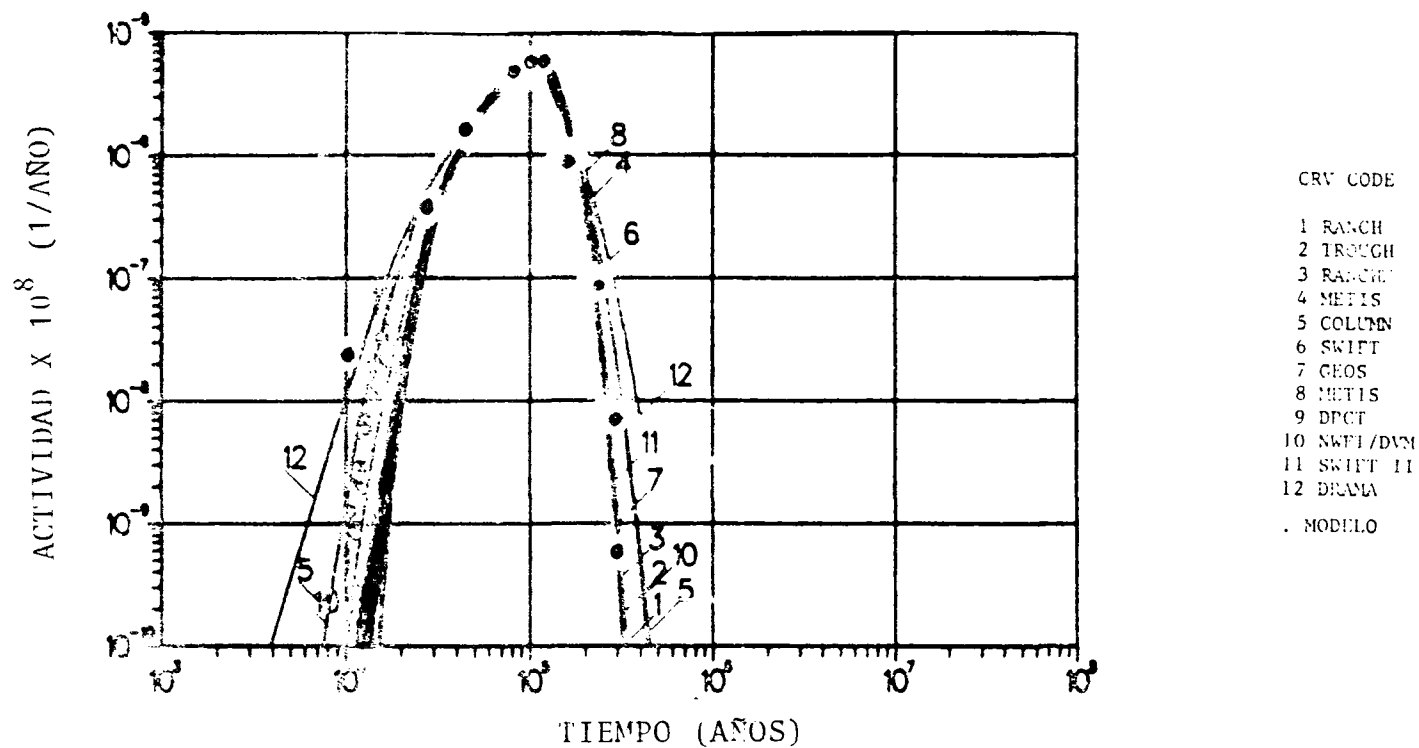


Figura 38 - Nucleido 3 (U^{233})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 Pe = 10 - 42 nodos

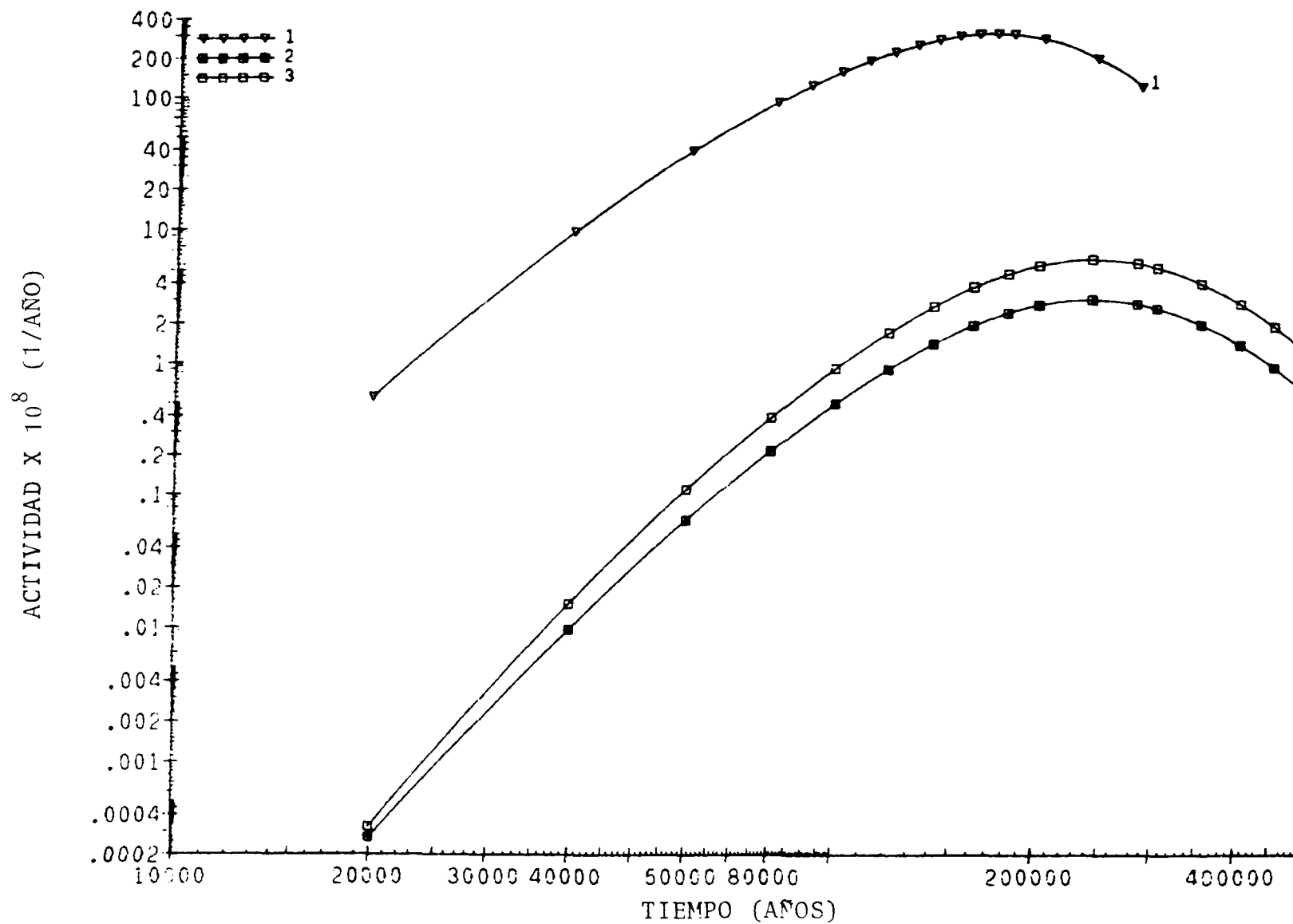


FIGURA 39 - EJEMPLO 4 - Caso 1
 $Pe = 10.22$ nodos. $\Delta t = 100$ años. $L = 500$ m
 ∇ = actividad U^{234}
 $\boxplus$ = actividad Th^{230}
 $\boxminus$ = actividad Ra^{226}

NUCLIDE 1

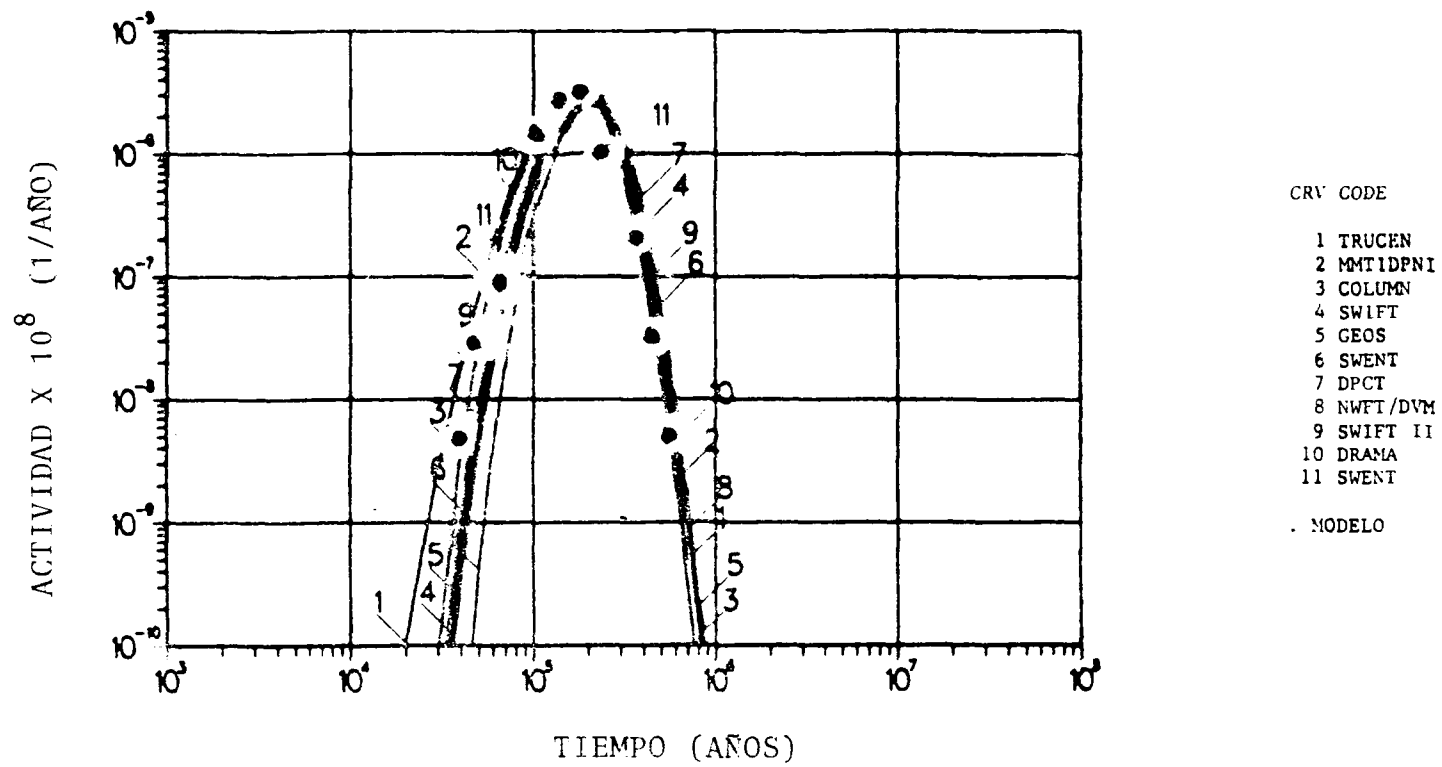


Figura 40 - Nucleido 1 (U^{234})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 Pe = 10 - 42 nodos

NUCLIDE 2

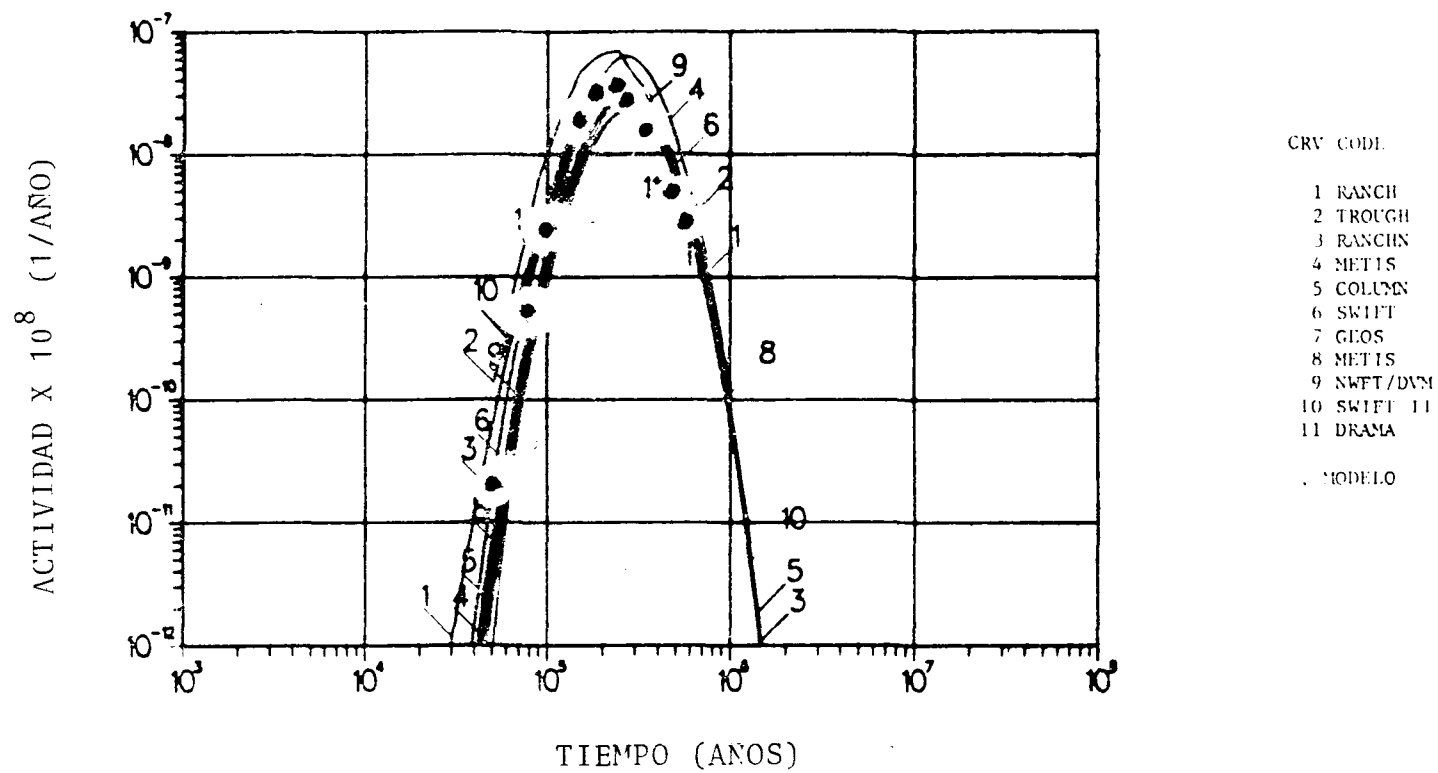


Figura 41 - Nucleido 2 (Th^{230})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 Pe = 10 - 42 nodos

NUCLIDE 3

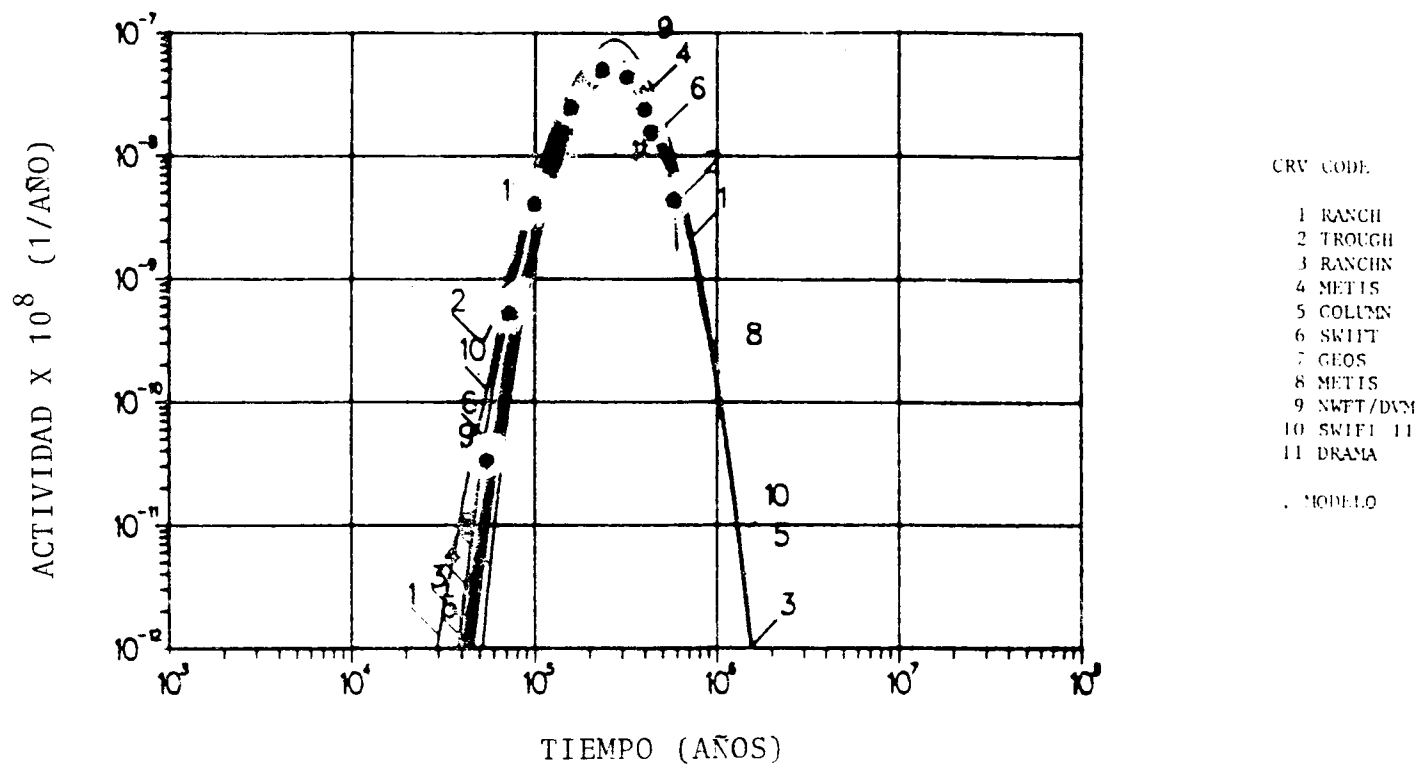


Figura 42 - Nucleido 3 (Ra^{226})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 Pe = 10 - 42 nodos

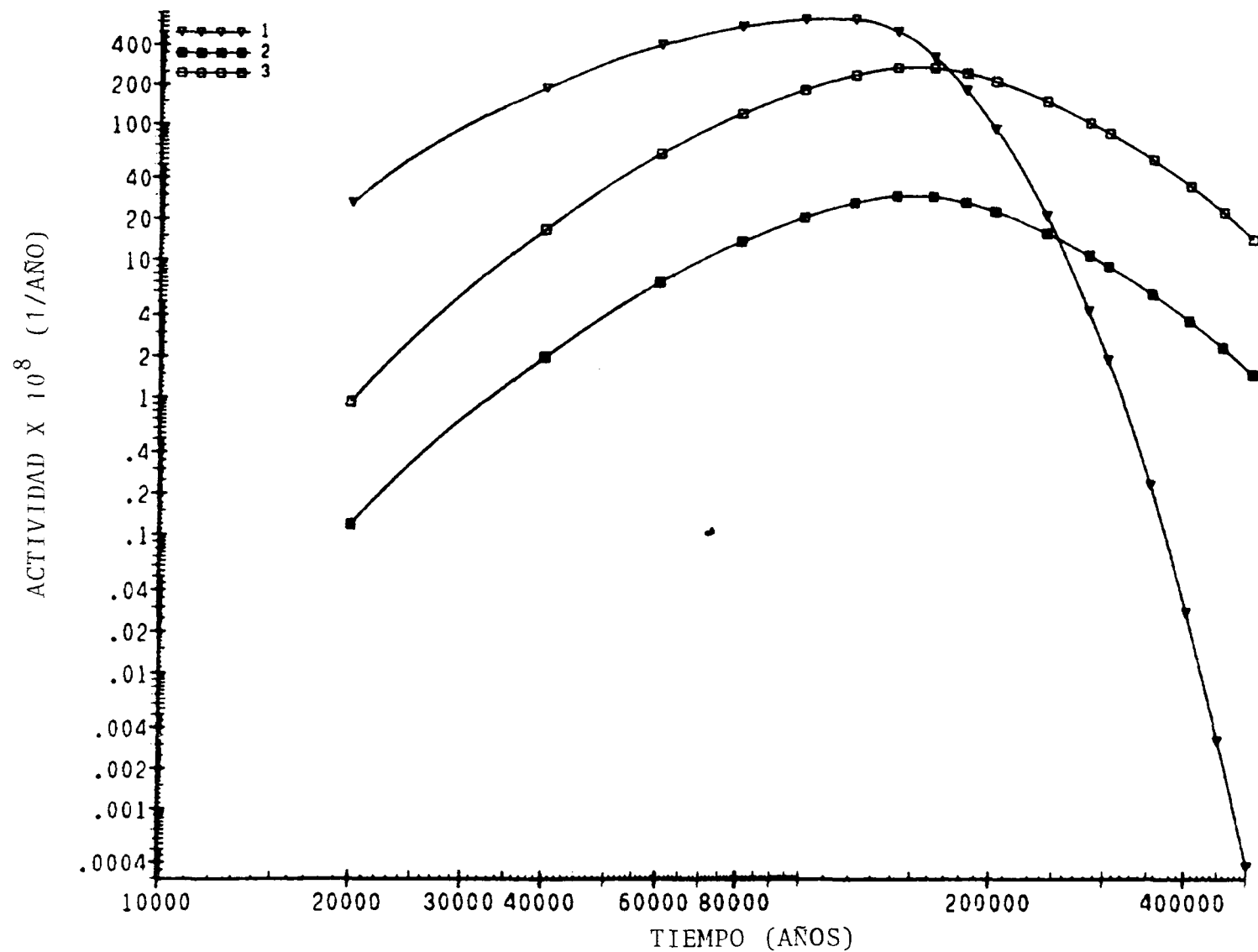


FIGURA 43 - EJEMPLO 4 - Caso 2

$Pe = 10.22$ nodos. $\Delta t = 100$ años. $L = 500$ años

∇ = actividad U^{234}

$\square$ = actividad Th^{230}

$\diamond$ = actividad Ra^{226}

NUCLIDE 1

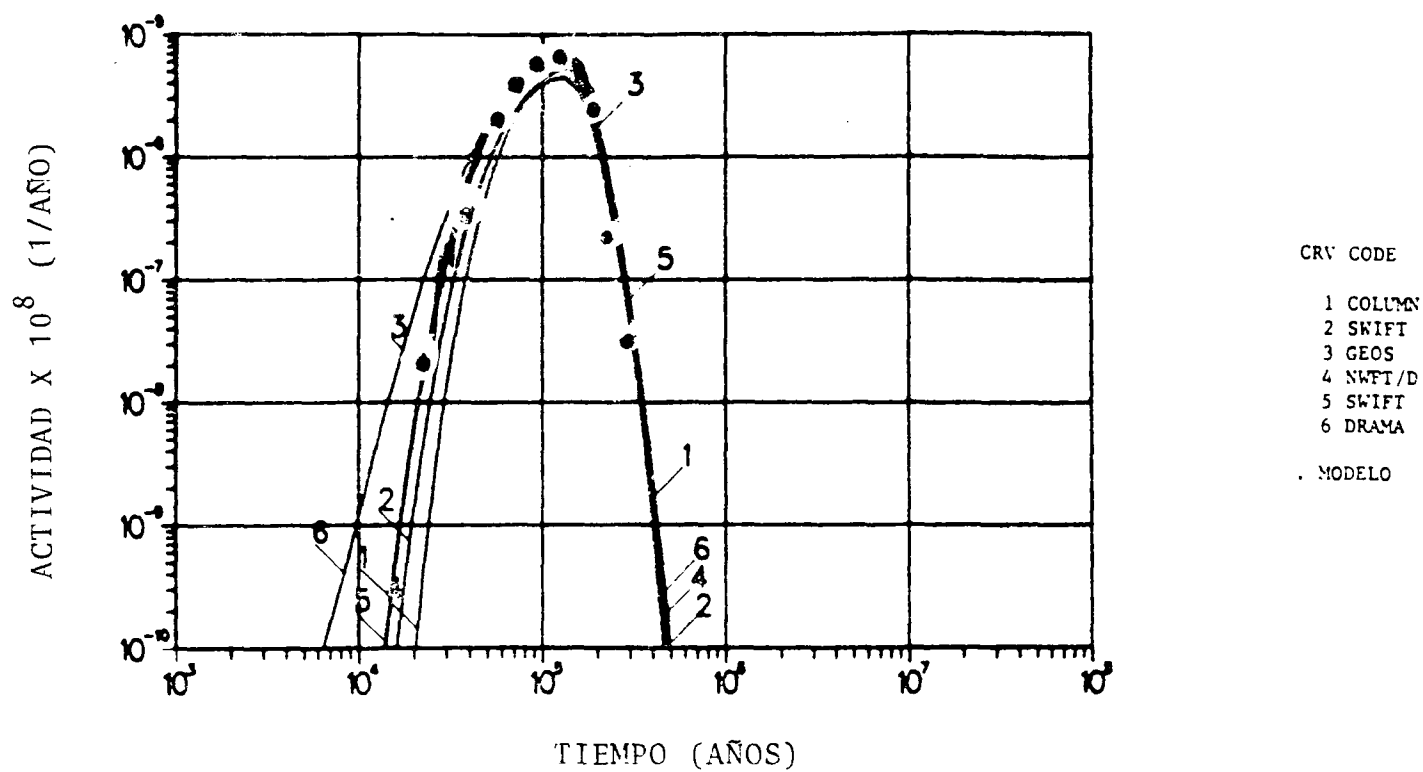


Figura 44 - Nucleido 1 (U^{234})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 Pe = 10 - 42 nodos

NUCLIDE 2

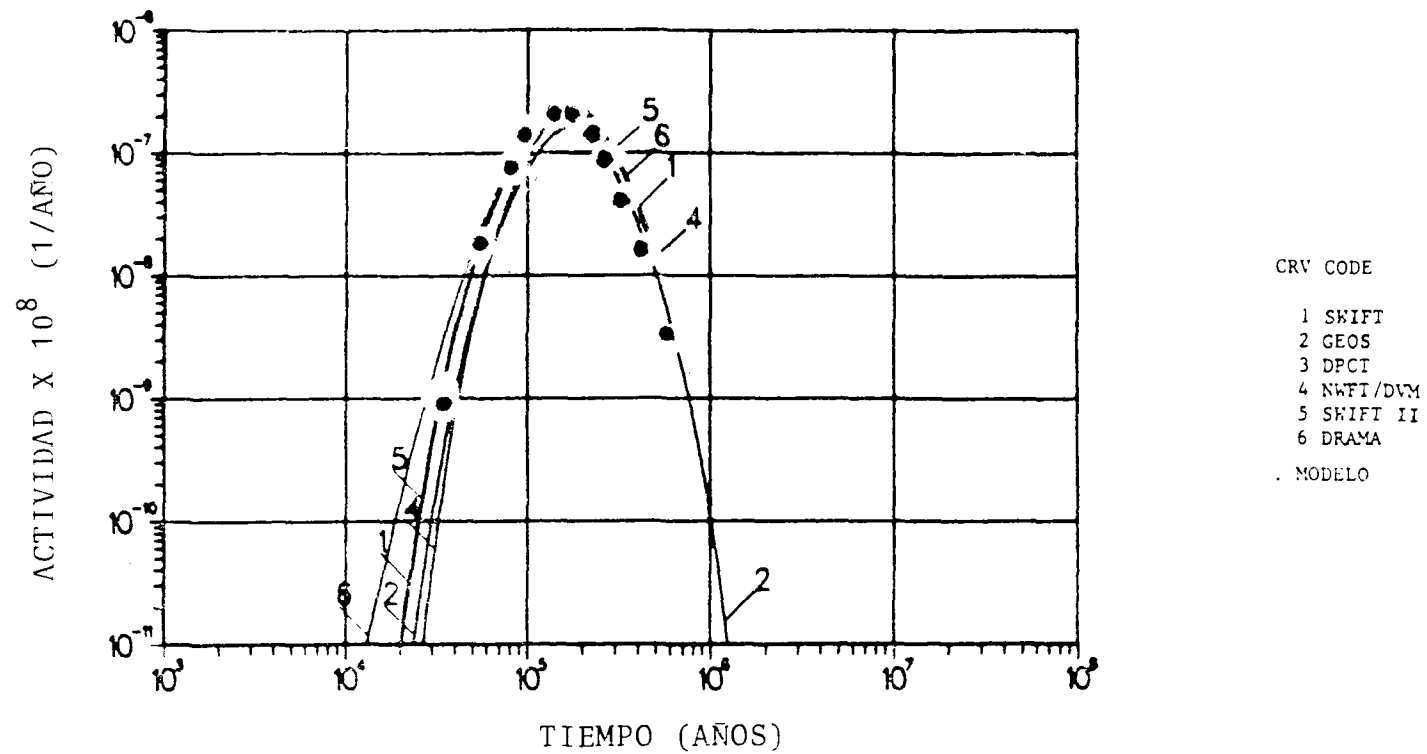


Figura 45 - Nucleido 2 (Th^{230})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 Pe = 10 - 42 nodos

NUCLIDE 3

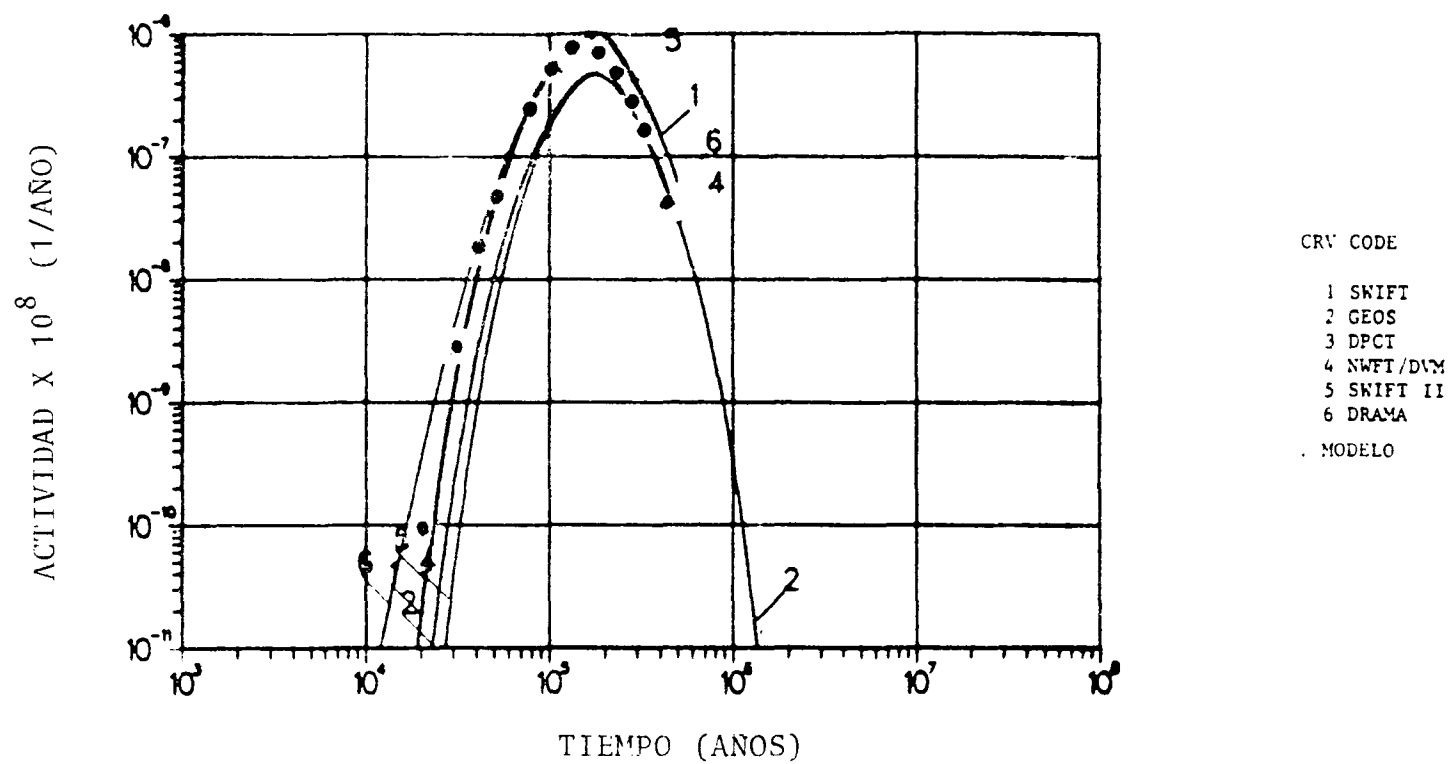


Figura 46 - Nucleido 3 (Ra^{226})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACOIN /9/
 Pe = 10 - 42 nodos

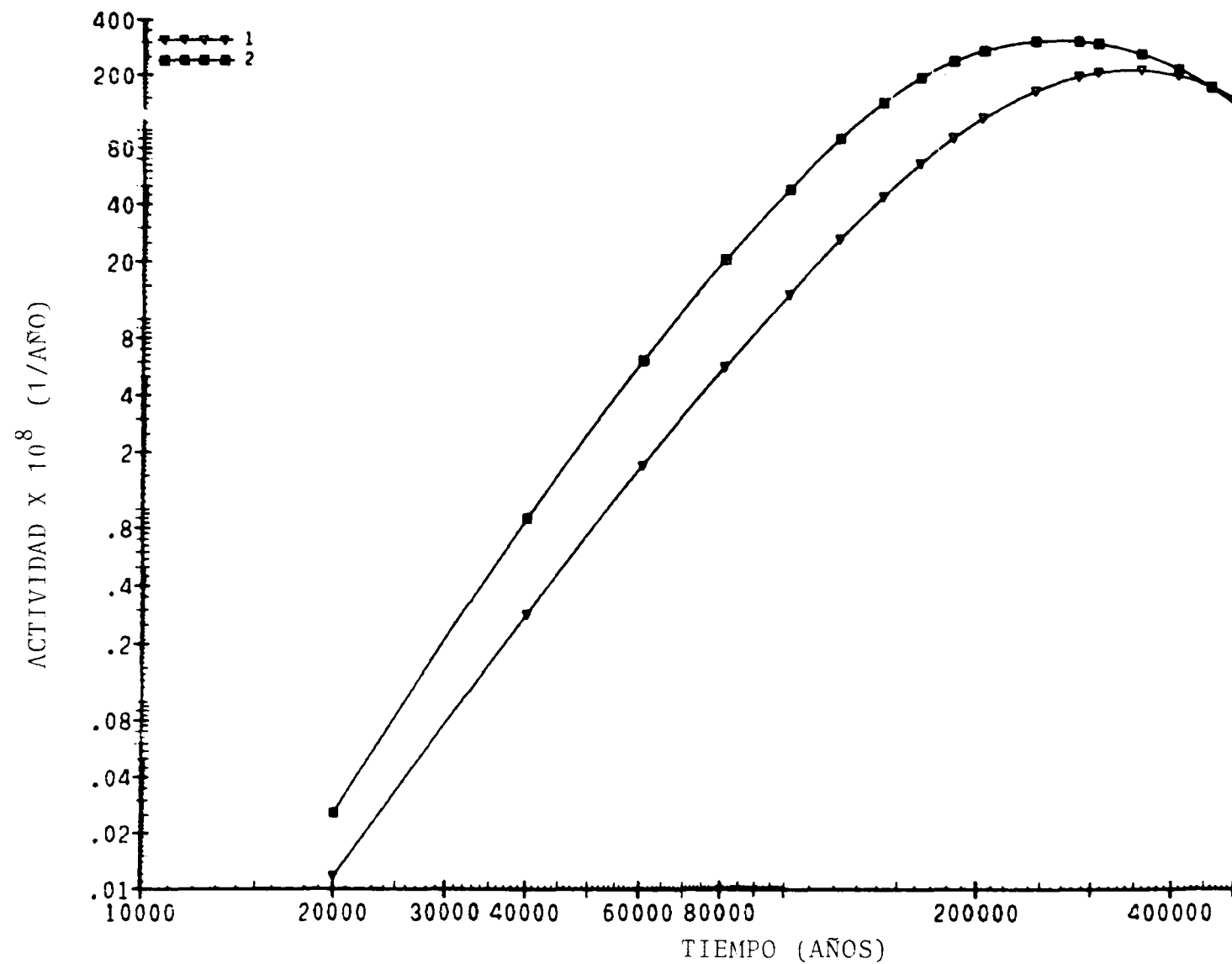


FIGURA 47 - EJEMPLO 4 - Caso 3
 $Pe = 10.22$ nodos. $\Delta t = 100$ años . $L = 500$ años
 ∇ = actividad Np^{231}
 $\boxtimes$ = actividad U^{233}

NUCLIDE 2

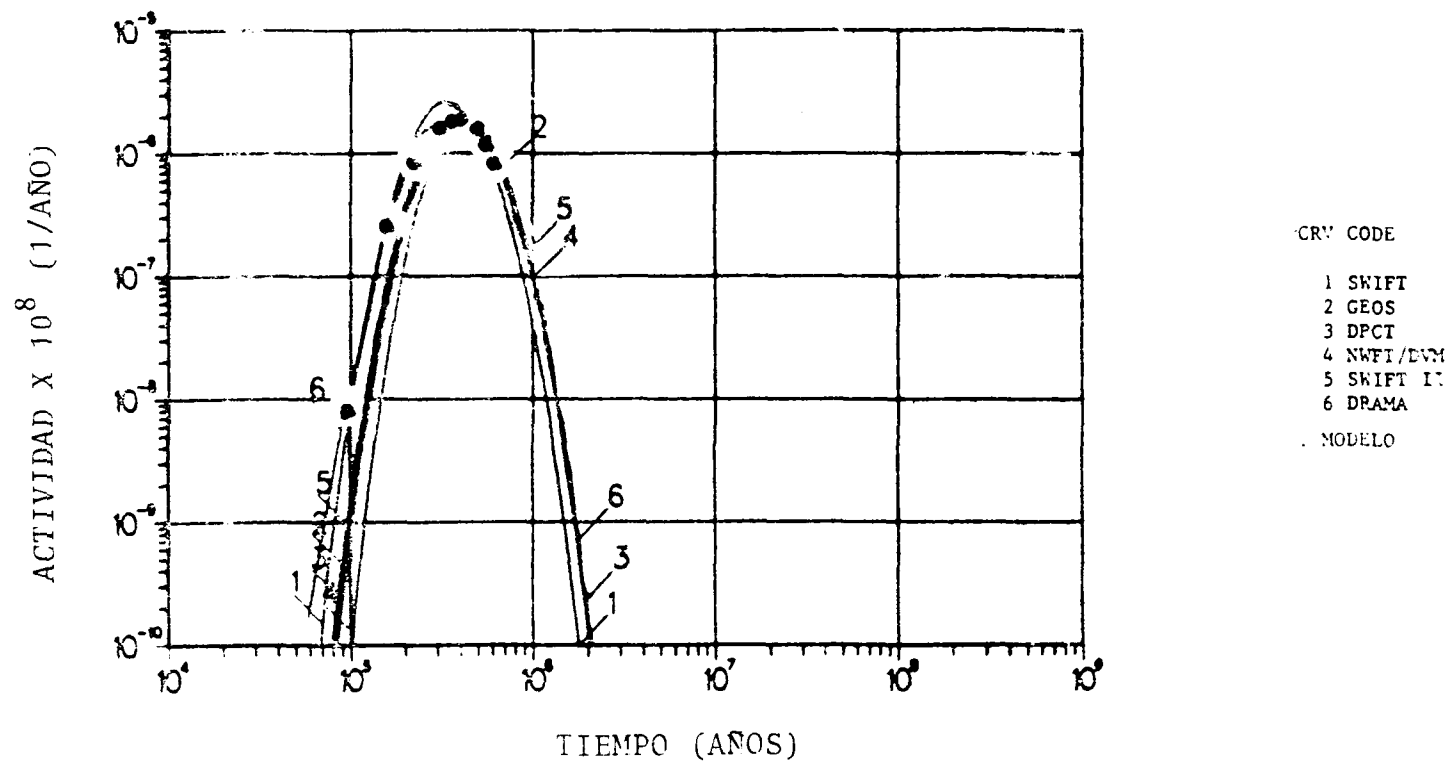


Figura 48 - Nucleido 2 (Np^{231})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACOIN /9/
 $P_e = 10 - 42$ nodos

NUCLIDE 3

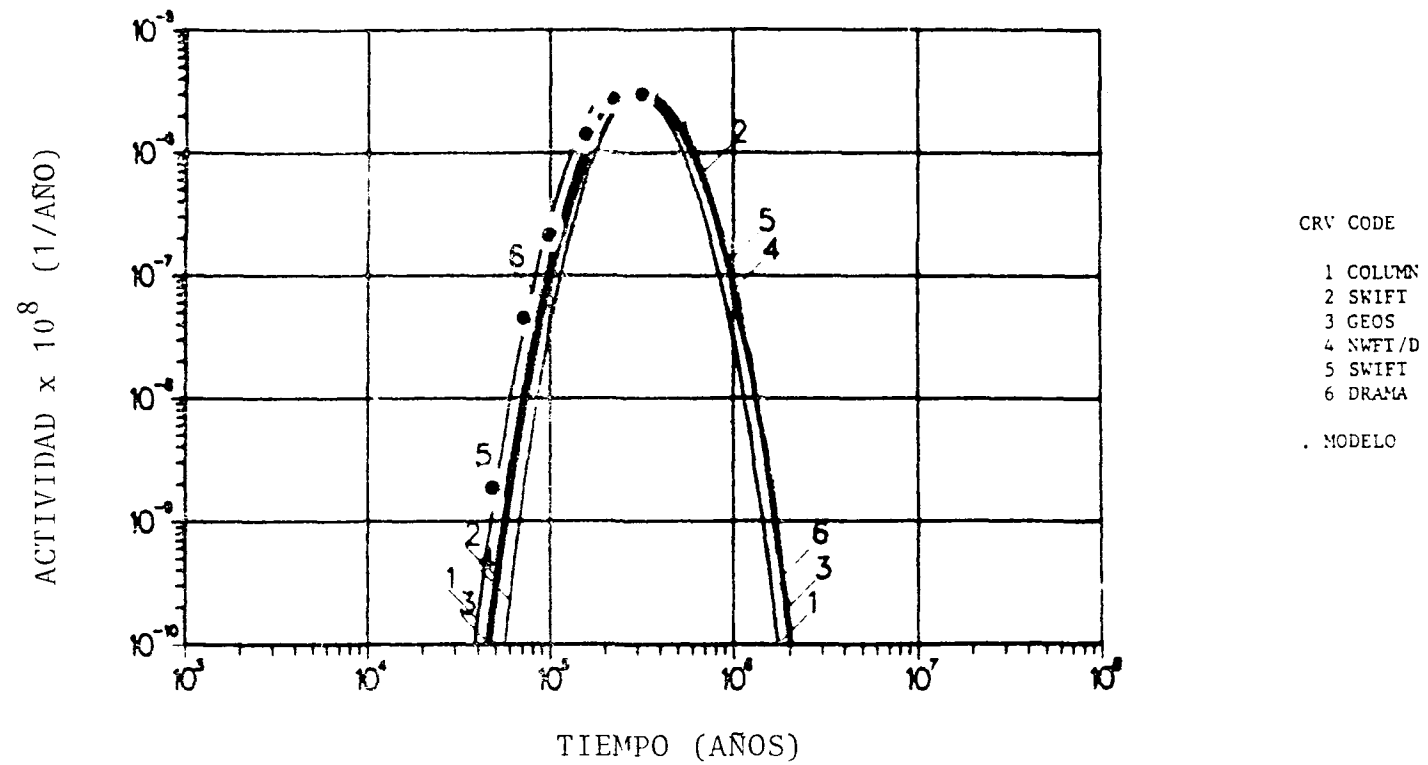


Figura 49 - Nucleido 3 (^{231}Pa)
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 Pe = 10 - 42 nodos

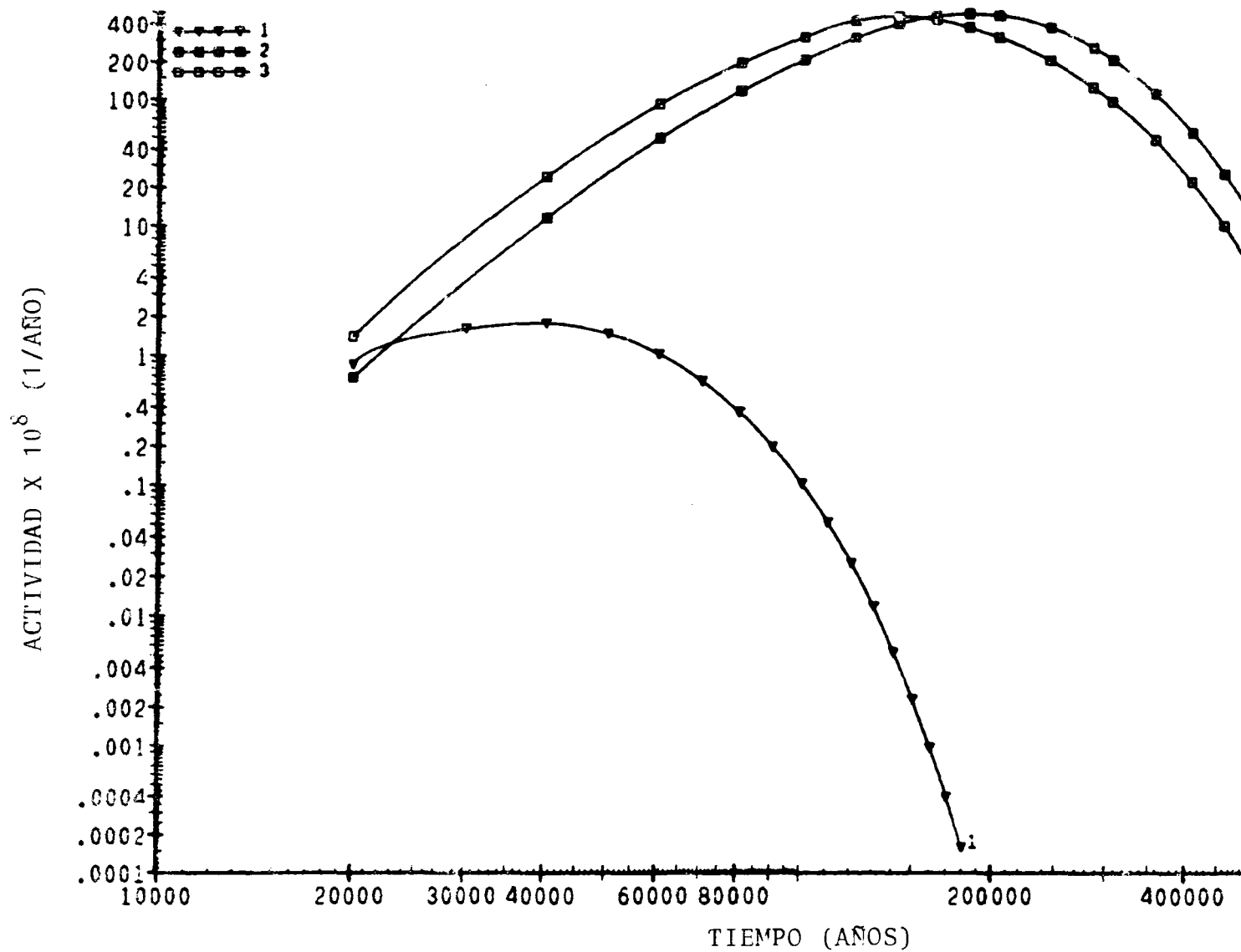


FIGURA 50 - EJEMPLO 4 - Caso 1
 $Pe = 10.22$ nodos. $\Delta t = 100$ años. $L = 500$ m
 ∇ = actividad Cm^{245}
 $\oplus$ = actividad Np^{231}
 $\equiv$ = actividad U^{233}

NUCLIDE 1

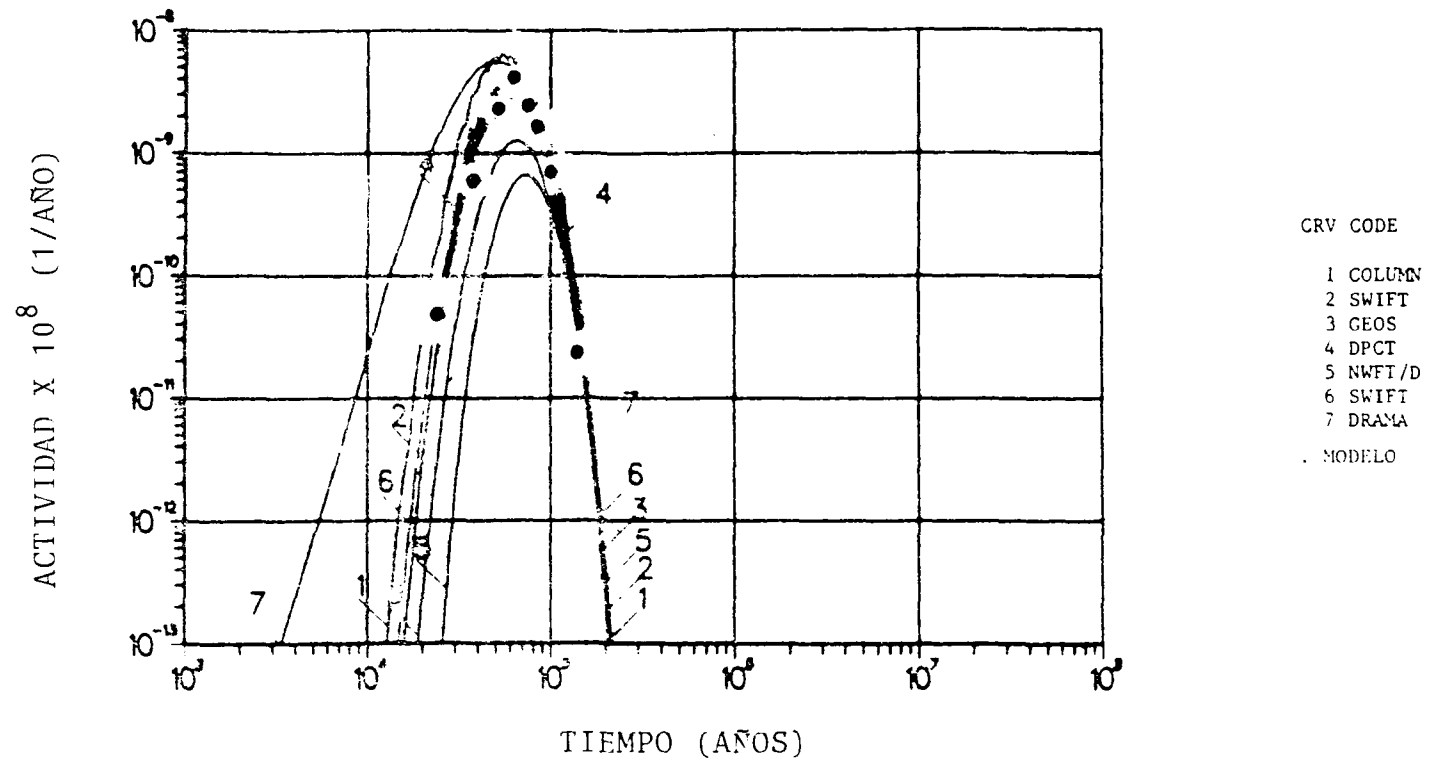


Figura 51 - Nucleido 1 (Cm^{245})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 $P_e = 10 - 42$ nodos

NUCLIDE 2

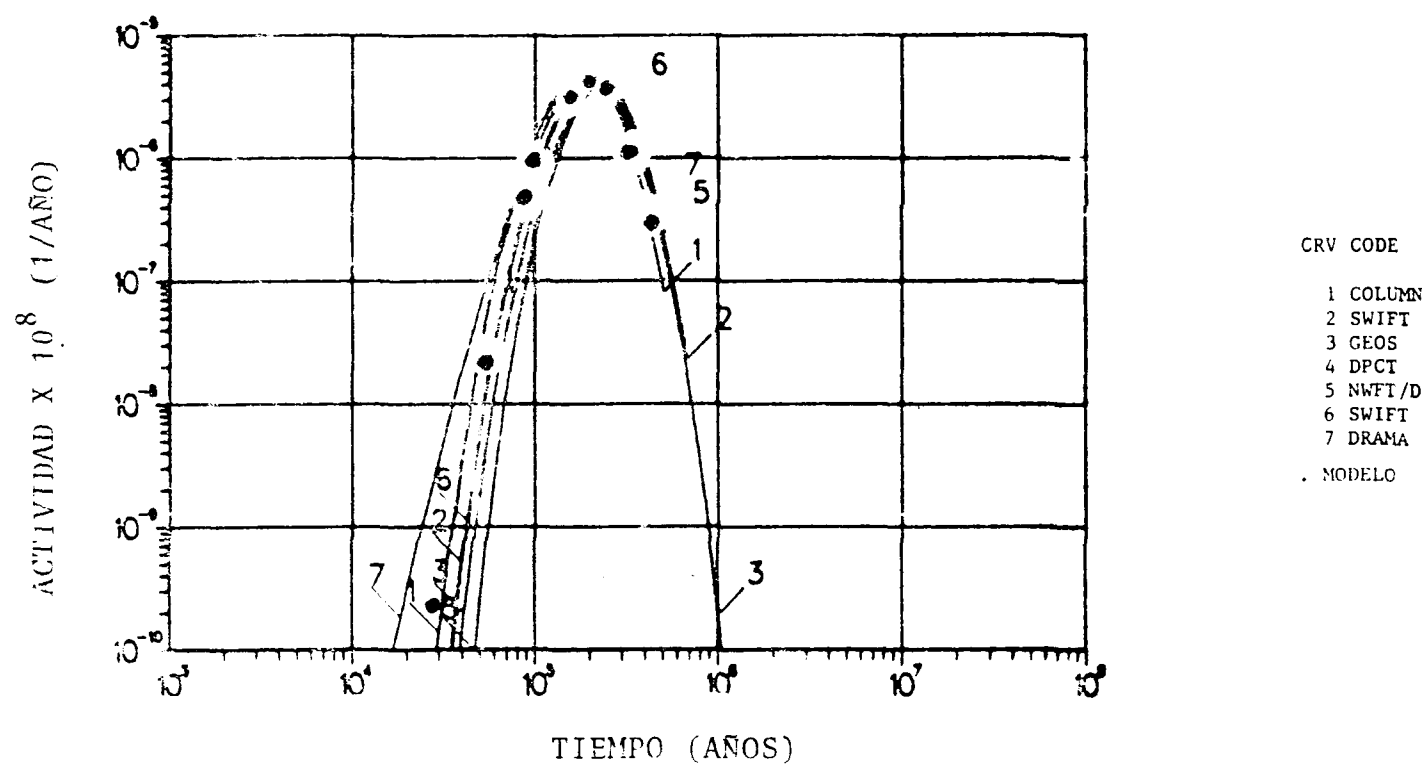
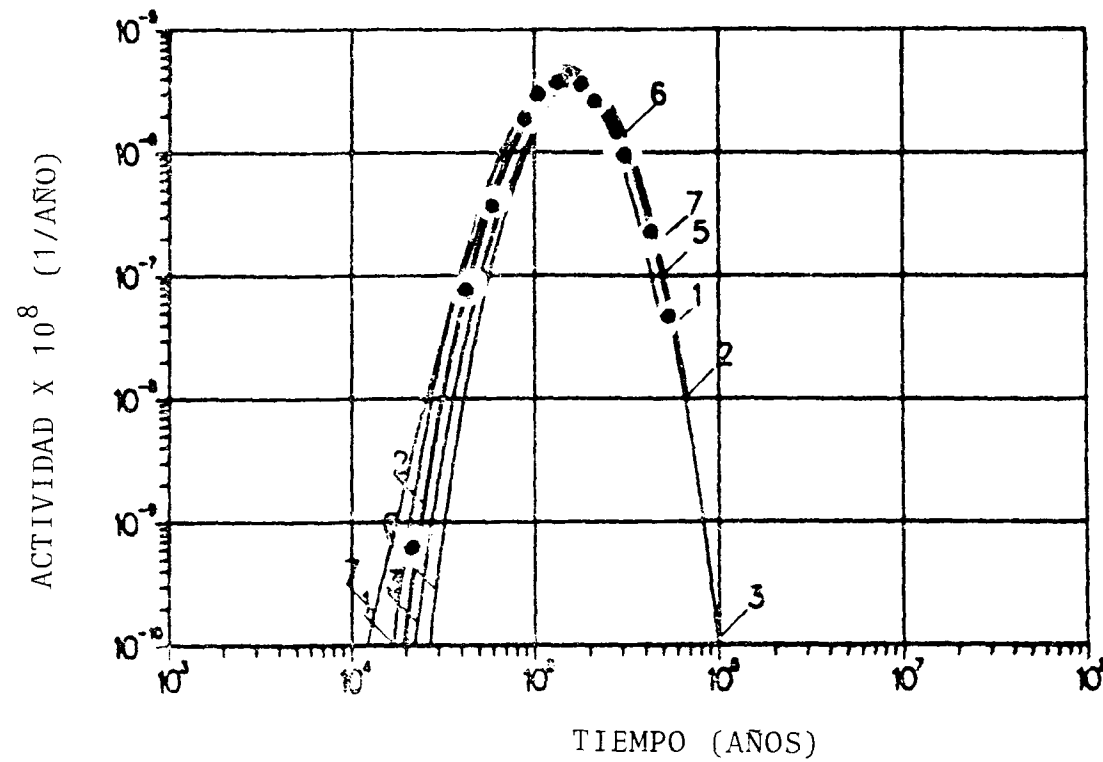


Figura 52 - Nucleido 2 (Np^{231})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 $P_e = 10 - 42$ nodos

NUCLIDE 3



CRV CODE

- 1 COLUMN
- 2 SWIFT
- 3 GEOS
- 4 DPCT
- 5 NWFI/D
- 6 SWIFT
- 7 DRAMA

. MODELO

Figura 53 - Nucleido 3 (U^{233})
 Comparación de resultados con
 el experimento INTRACON /9/
 Pe = 10 - 42 nodos

- REPO-01 Beninson, D.; Migliori de Beninson, A.
"Radiological impact of radioactive waste management"
- REPO-02 Lucero Michaut, H.
"Aplicación de la geoestadística a la resolución de problemas estructurales en macizos rocosos homogéneos"
- REPO-03 Ventura, M.; Ferreri, J.C.
"Evolución temporal de un macizo granítico bajo cargas térmicas generadas por productos de fisión"
- REPO-04 Ventura, M.; Ferreri, J.C.
"Evolución temporal de un macizo granítico bajo cargas térmicas generadas por productos de fisión (estudio paramétrico)"
- REPO-05 Beninson, D.
"Radioactive emissions and radiation exposures resulting from nuclear power production"
- REPO-06 Beninson, D.; Lindell, B.
"Application of ICRP recommendations to radioactive waste isolation"
- REPO-07 Migliori de Beninson, A.; Cancio, D.
"Impacto radiológico de la gestión de residuos radiactivos del Programa Nuclear Argentino"
- REPO-08 Migliori de Beninson, A.; Palacios, E.
"Política en materia de gestión de desechos y su aplicación en Argentina"
- REPO-09 Palacios, E.; et al.
"Bases conceptuales para la construcción de un repositorio en la Argentina".
- REPO-10 Palacios, E.; et al.
"Estudios para la selección del emplazamiento de un repositorio en Argentina"
- REPO-11 Matar, J.A.; Girardi, J.P.; Matar de Sarquís, M.
"Aplicación de técnicas geoestadísticas al estudio de una formación granítica destinada a la construcción de un repositorio"
- REPO-12 Ferreri, J.C.; VENTURA, M.
"Numerical aspects of the study of the regional thermal impact of a radioactive waste repository"
- REPO-13 Ferreri, J.C.; Caballero, C.H.
"Difusión de calor a partir de una fuente plana rectangular finita"
- REPO-14 Beninson, D.; González, A.J.
"Radiological protection criteria for radioactive waste repositories"
- REPO-15 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"

- REPO-16 Ferreri, J.C.; Ventura, M.
"Aspectos numéricos del modelado de los efectos locales de un repositorio de residuos radiactivos de alta actividad"
- REPO-17 Beninson, D.
"Criterios de radioprotección en el caso de eventos disruptivos probabilísticos"
- REPO-18 Ferreri, J.C.; Grandi, G.
"Models for the study of the local effects produced by a high-level radioactive waste repository"
- REPO-19 Beninson, D.J.; et al.
"The argentine radioactive waste repository: basic criteria, preliminary siting and design conceptual basis"
- REPO-20 De Micheli, S.M. de; et al.
"Uso del plomo en contenedores de residuos radiactivos de alta actividad: estudio de resistencia a la corrosión"
- REPO-21 Peruca, J.C.; et al.
"Investigaciones geológicas e hidrológicas con procesamiento geoestadístico en la preselección del emplazamiento de un repositorio subterráneo para los residuos radiactivos de alta actividad del Programa Nuclear Argentino"
- REPO-22 Varani, J.L.; et al.
"Analysis of different vitreous matrices of the borosilicatype"
- REPO-23 Varani, J.L.; Petraitis, E.J.; Vazquez, A.
"Vitrificación de residuos radiactivos líquidos de alta actividad"
- REPO-24 Varani, J.L.; Petraitis, E.J.; Pasquali, R.C.
"Evaluación de matrices vitreas para inclusión de residuos radiactivos"
- REPO-25 Russo, D.; Messi de Bernasconi, N.; Audero, M.
"Fijación de residuos de alta actividad en matriz vítrea sinterizada"
- REPO-26 Wetten, C.; Grassi, J.I.
"Hydrogeological features of a rocky massif to be used as a nuclear repository"
- REPO-27 Girardi, J.P.; Matar de Sarquís, M.
"Selection of a minimum fracturation area by means of geostatistic for emplacement of subsurface civil works of a nuclear repository in crystalline rock"
- REPO-28 Matar, J.A.; et al.
"Geostatistical investigations of rock masses. The Sierra del Medio case (Argentina)"
- REPO-29 Perucca, J.C.; et al.
"Geological and geophysical investigations at Sierra del Medio Massif - Argentina"

- REPO-30 Russo, D.O.; Messi de Bernasconi, N.; Audero, M.A.
"Inmovilización de residuos de alta actividad en vidrios sinterizados: 1) Proceso de prensado en caliente"
- REPO-31 Bevilacqua, A.M.; et al.
"Inmovilización de residuos de alta actividad en vidrios sinterizados: II) Proceso de prensado a temperatura ambiente"
- REPO-32 Ventura, M.
"Predicción de la migración de radionucleídos en un medio rocoso. Parte I"
- REPO-33 Ventura, M.
"Predicción en la migración de radionucleídos en un medio rocoso. Parte II-Caso bidimensional"
- REPO-34 Palacios, E.
"Política argentina para la eliminación de residuos radiactivos"
- REPO-35 Pahisa, M.; et al.
"Primeros ensayos vinculados a la vitrificación de residuos líquidos de alta actividad".

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. 248)	701 - 2431
Centro Atómico Ezeiza Ezeiza Atomic Center	Casilla de Correo 40 1802 - Aeropuerto Ezeiza Argentina	23462 CAE PRS AR	620 - 0480	620 - 0160