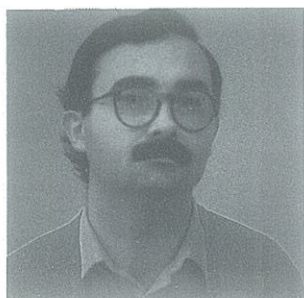




Agustín ALONSO SANTOS es Licenciado en Ciencias Químicas, Doctor en Ciencias Físicas e Ingeniero Industrial. Catedrático de Tecnología Nuclear de la ETSII de la Universidad Politécnica de Madrid desde 1981, y en la misma Escuela de la Universidad Politécnica de Barcelona desde 1976 a 1981. Participó en la creación y desarrollo del Departamento de Seguridad Nuclear de la JEN del que fue Director hasta la creación del CSN. Ha sido Presidente de la SNE. Conferenciante en cursos inter-regionales del OIEA.



Eduardo GALLEGO DIAZ es Ingeniero Industrial, especialidad Técnicas Energéticas (Madrid, 1982). Trabaja durante año y medio en Empresarios Agrupados, Departamento de Seguridad, Sección de Protección Radiológica. En diciembre de 1983 pasa a formar parte del grupo de Análisis de Consecuencias de los Accidentes de la Cátedra de Tecnología Nuclear. Desde el curso 1985-1986 es Profesor Asociado de dicha Cátedra, colaborando también periódicamente en cursos del Instituto de Estudios de la Energía (CIEMAT) y del Forum Atómico Español.



José Enrique MARTÍN GARCÍA es Ingeniero Técnico Industrial, especialidad Mecánica (Béjar, 1983), e Ingeniero Industrial, especialidad Técnicas Energéticas (Madrid, 1987). En 1987 obtuvo una beca de la SNE durante dos meses en el CEA/IPSN (Francia). Desde noviembre de 1987 forma parte del grupo de Análisis de Consecuencias de los Accidentes de la Cátedra de Tecnología Nuclear.

UNA HERRAMIENTA PARA EL DISEÑO DE PLANES DE EMERGENCIA

LOS MODELOS PARA ANALISIS PROBABILISTA DE LAS CONSECUENCIAS DE LOS ACCIDENTES.

A. ALONSO - E. GALLEGO - J. MARTIN

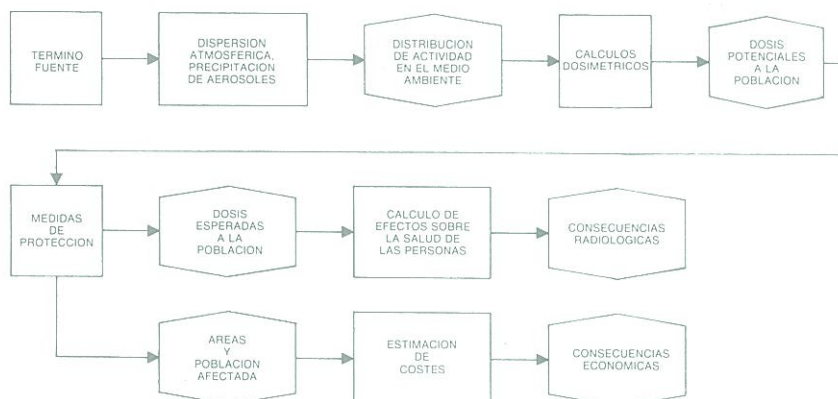
INTRODUCCION

Las graves consecuencias radiológicas que podrían derivarse de un accidente nuclear severo, con la consiguiente liberación de grandes cantidades de productos radiactivos a la atmósfera, pueden mitigarse con la adopción de medidas de protección adecuadas, tanto durante las primeras fases del accidente como en las posteriores al mismo. Dichas medidas se integran en los planes de emergencia, que en nuestro país se elaboran tomando como referencia el recientemente aprobado Plan Básico de Emergencia Nuclear. Los modelos para análisis de las consecuencias de los accidentes (ACA) pueden resultar de gran utilidad al planificador, ya que permiten realizar una estimación a priori de la influencia que distintos parámetros podrían tener sobre los daños producidos. Dichos daños, en esencia, dependerán de tres tipos de variables:

- La magnitud y características de los términos fuente, o escapes radiactivos considerados como posibles.
- Las características del emplazamiento, tanto desde el punto de vista meteorológico como socio-económico.
- Las actuaciones de protección supuestas.

Todas estas variables, consideradas con un enfoque probabilista, se integran en los modelos ACA, cuyas etapas básicas se reflejan en la figura 1. Los términos fuente utilizados en los cálculos deben cubrir un espectro lo más amplio posible, y su magnitud y probabilidad son estimadas a partir de los Análisis Probabilistas de Seguridad (APS), en sus Niveles I y II, que incluyen el análisis de sistemas, la cuantificación de secuencias accidentales y el análisis fenomenológico de las correspondientes secuencias. Sin embargo, para los fines planteados en este artículo, podría recurrirse a términos fuen-

FI Etapas básicas en el análisis de consecuencias de los accidentes



te genéricos suficientemente representativos del tipo de central nuclear ubicada en el emplazamiento analizado.

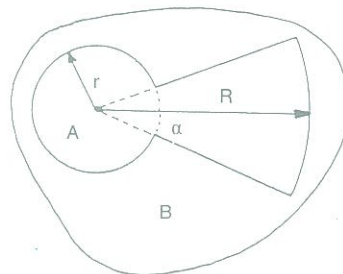
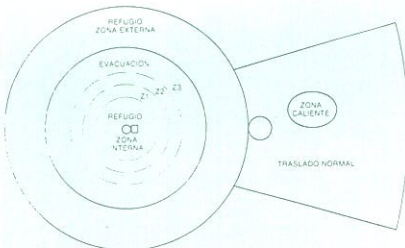
Las características meteorológicas del emplazamiento, de naturaleza temporal aleatoria, han de ser debidamente consideradas, para representar adecuadamente el conjunto de posibles distribuciones de los contaminantes en el medio ambiente, una vez liberados a la atmósfera. Ello se logra tomando un número representativo de secuencias meteorológicas que típicamente ronda el centenar, y asociando a cada una de ellas sus correctas probabilidades, obtenidas de los registros meteorológicos efectuados en el emplazamiento. Por otra parte, para poder estimar las consecuencias radiológicas y económicas es importante utilizar datos lo más detallados y realistas acerca de la distribución de la población y uso de la tierra, incluyendo muy especialmente la producción agropecuaria, dada su gran influencia en los efectos radiológicos a largo plazo. Dichos datos conferirán al análisis la imprescindible adecuación al emplazamiento.

Una vez seleccionados los términos fuente y descritas suficientemente las características del emplazamiento, puede ya estudiarse la idoneidad de las diferentes medidas de protección y de los criterios seguidos para su adopción, buscando un mejor diseño de las estrategias a seguir ante todo el espectro de situaciones accidentales posibles.

El impacto de las distintas acciones o criterios sobre las consecuencias radiológicas y económicas estimadas —derivadas estas últimas de la adopción de las propias medidas de protección— y, en concreto, sobre sus funciones de distribución, será un fiel indicador de la eficacia de las mismas, a la vez que permitirá realizar análisis costo-efectividad de gran utilidad para la toma de decisiones.

Otras consideraciones sociales o políticas también habrán de ser tenidas en cuenta pero, al no admitir una fácil modelización matemática, requerirán un análisis de diferente naturaleza.

F II Esquema de las medidas de emergencia consideradas en MACCS



Zona A:

Acciones:

Definición:

Confinamiento y/o evacuación

Area en forma de ojo de cerradura, con radio interno r , radio externo R y sector ángulo α

Zona B:

Acciones:

Definición:

Confinamiento, traslado

Traslado cuando la dosis aguda a los pulmones, la médula ósea o el sistema gastro-intestinal supere el límite elegido.

F III UFOMOD. Medidas de protección para la fase de emergencia

Seguidamente se describen las posibilidades de dos de los códigos de cálculo más recientes desarrollados: el UFOMOD (ref. 1) de la RFA, y el MACCS (ref. 2), estadounidense, mostrando los diferentes tipos de resultados que pueden ofrecer. Por último, se hace mención de los trabajos actualmente en curso en relación con este área.

MEDIDAS DE PROTECCION CONSIDERADAS EN LOS CODIGOS MACCS Y UFOMOD

El código MACCS (Melcor Accident Consequence Code System) ha sido desarrollado por los Laboratorios Nacionales de Sandia (EE. UU.) como parte del nuevo sistema integrado para análisis del riesgo. Ha sido utilizado en el reciente informe NUREG-1150 (ref. 3).

Por su parte, el código UFOMOD (Unfallfolgenmodell) ha sido desarrollado en el Centro de Investigación Nuclear de Karlsruhe (República Federal Alemana), para sustituir al código del mismo nombre empleado en el Estudio de Riesgo Alemán publicado en 1979. En el nuevo código, que se utilizará en la fase B de dicho estudio, han participado también otras prestigiosas instituciones de la RFA, así como de la Comunidad Europea, a través del proyecto MARIA (Methods for Assessing the Radiological Impact of Accidents). Ambos códigos diferencian muy claramente lo que son acciones mitigativas a corto plazo, durante la fase de emer-

gencia, de las medidas adoptadas a medio y largo plazo. Los modelos respectivos se presentan a continuación.

MACCS

Tres medidas de protección son consideradas en MACCS durante la fase de emergencia; éstas se reflejan en la figura II:

- Evacuación. En la versión actual se contempla la evacuación radial desde el reactor a velocidad constante. Futuras versiones del código contemplarán la evacuación según la red vial de cada emplazamiento. Se pueden definir diferentes factores de blindaje y tasas de respiración en función de la actividad de las personas, distinguiendo las que están siendo evacuados, las confinados y las que hacen vida normal. El usuario puede definir tres zonas de evacuación que están caracterizadas por diferentes tiempos de espera hasta producirse la misma. Las personas evacuadas evitan la exposición al escape radiactivo a partir de determinada distancia.
- Refugio o confinamiento: Se supone que las personas permanecen en sus casas cerrando puertas y ventanas durante el tiempo de confinamiento, especificado por el usuario del código de modo que haya tiempo de que finalice el paso de la nube radiactiva. Se pueden definir dos zonas de confinamiento, una interior a las zonas de evacuación y otra exterior.

- Traslado: El código MACCS 1.4 puede tener en cuenta el traslado de la población posterior al accidente, una vez obtenido el perfil dosimétrico en la zona. Se consideran dos tipos de traslado: traslado normal y traslado de zonas calientes, caracterizado cada uno de ellos por el correspondiente criterio de dosis al órgano crítico y por los tiempos en que se realiza el traslado.

Las acciones a medio y largo plazo dependen de las vías de exposición a la radiación, así como del impacto radiológico potencial a la salud (criterios de limitación de dosis). Las acciones para el medio plazo (típicamente treinta días), toman en cuenta la exposición externa al suelo contaminado e interna por inhalación del material radiactivo depositado en el suelo y resuspendido; sólo se toma como acción mitigativa el traslado, en función del perfil dosimétrico de la zona, y el criterio de dosis elegido.

Para el caso de la exposición a largo plazo, el código distingue entre la exposición directa (al suelo y al material resuspendido) y la exposición indirecta (causada fundamentalmente por la ingestión de alimentos y agua contaminada). Para reducir la exposición directa el código contempla las siguientes medidas.

- **Traslado.**
- **Descontaminación:** considerando varios niveles según la técnica empleada y dos categorías para diferenciar la descontaminación agrícola de la no agrícola.
- **Prohibición del uso de propiedades:** cuando el nivel de contaminación sea muy alto, haciendo inviable la descontaminación.

Las medidas protectoras que contempla el código para reducir la exposición indirecta son: la prohibición de uso (temporal o permanente) de terrenos agrícolas, la descontaminación y la requisición de productos agrícolas, haciendo una distinción especial para el caso de la leche. La decisión se toma cuando se sobrepasan determinados niveles de concentración en el suelo (Bq/m^2) de los radionucleidos con más importancia en las cadenas tróficas.

UFOMOD

Aunque el código UFOMOD considera prácticamente las mismas medidas que el código MACCS, el enfoque dado es algo diferente. Para el caso de las medidas a corto plazo (fase de emergencia) tenemos las siguientes (ver figura III):

- Se considera la evacuación de las personas en una zona A con forma de ojo de cerradura. A diferencia del código MACCS, la evacuación tiene lugar una vez que ha finalizado el

escape. Hasta el momento de producirse ésta, organizada por las autoridades, se puede suponer que parte de la población se evacúa espontáneamente, parte está refugiada y parte está fuera de sus casas, debido a que no se ha enterado del incidente, esté ilocalizable o por cualquier otra causa. Para cada uno de los grupos se consideran factores de blindaje específicos. El tiempo que dura la evacuación va a depender de la densidad de la población y de la distancia a donde van a ser trasladados, definiéndose tres fracciones de población diferentes, con distintas velocidades de evacuación.

- Por otro lado, la evacuación de la zona B se realiza según un criterio de intervención, basado en la dosis por exposición a corto plazo a los tres órganos más críticos (médula ósea, pulmón y sistema gastro-intestinal). La evacuación de esta zona se produce de una forma similar a la de la zona A, pero nunca se realizará antes que aquélla.

Para el largo plazo, el código considera la descontaminación si la dosis efectiva debida a todos los caminos de exposición, excepto por ingestión, está comprendida entre el nivel de intervención (mSv/año) y el producto de éste por el máximo factor de descontaminación, ambos definidos por el usuario del código. Si el valor es superado en el primer año se estudia la posibilidad de traslado en el caso de que las dosis a corto plazo estén por debajo del criterio de dosis para la evacuación.

El código calcula el área donde va a ser necesaria la requisición de productos agrícolas por medio de curvas iso-

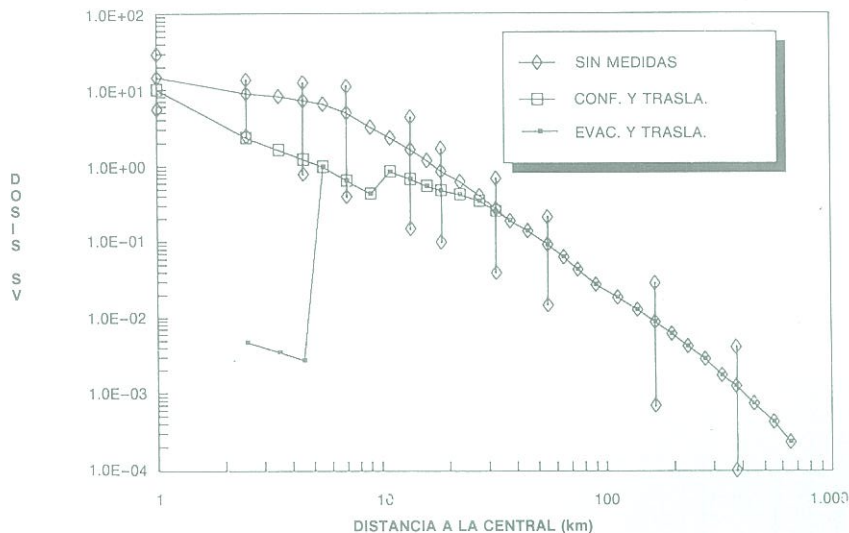
dosis, debidas a la ingestión de dichos productos durante un año.

RESULTADOS PROPORCIONADOS POR LOS CODIGOS

El número de posibles resultados proporcionados por estos códigos es ciertamente muy elevado, lo cual ofrece sin duda buenos elementos con los que evaluar las políticas de actuación en la emergencia y en la post-emergencia. Puesto que se trata de códigos probabilistas (aunque puedan ser utilizados también para tratamientos deterministas), sus resultados básicos vienen presentados en forma de funciones de distribución de probabilidad, o más comúnmente, de sus complementarias. Dichas curvas, llamadas habitualmente CCFD (curva complementaria de la función de distribución) o del riesgo, representan la probabilidad de que el resultado representado alcance o supere un determinado valor. También serán útiles en las evaluaciones los valores medios de las funciones, sus valores de corte (o probabilidad de alcanzar un resultado distinto de cero), y los distintos percentiles, que darán una idea de la dispersión en los resultados.

Aparte de los resultados finales del ACA utilizados en los análisis de riesgos —tales como curvas del riesgo relativas al número de víctimas tempranas o de cánceres latentes, al coste final de posibles accidentes, etc.—, son de mucha utilidad todos aquellos resultados intermedios que pueden ayudar a la definición de criterios, como por ejemplo los niveles de contaminación, las dosis a órganos individuales por diferentes vías de exposición y en dife-

FIV Dosis agudas a la médula ósea bajo el eje de la nube (dosis máximas en siete días)



rentes períodos de tiempo, las dosis colectivas, los riesgos máximo y medio de contraer un daño determinado, o los costes desglosados de cada medida protectora, todos ellos posibles de obtener además en función de la distancia al reactor.

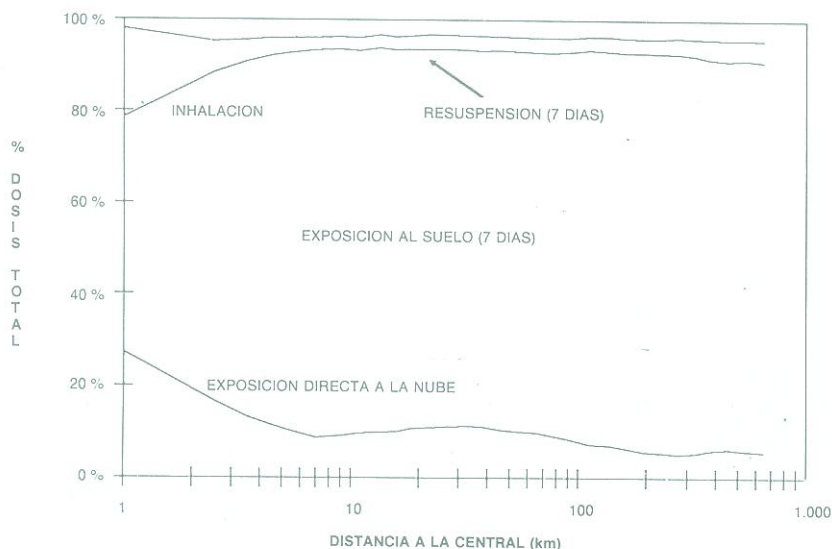
RESULTADOS PARA LA FASE DE EMERGENCIA

Los daños estimados por los modelos de ACA para la fase de emergencia pueden limitarse a dos tipos: dosis y efectos sobre la salud, ya que el daño económico durante esa fase, generalmente de corta duración, no será significativo.

A modo de ejemplo, en la figura IV se presentan las dosis agudas, durante los siete primeros días, recibidas en el órgano crítico, la médula ósea, bajo el eje de la nube radiactiva producida por un determinado escape en un emplazamiento determinado, según estimación realizada con MACCS 1.4. En la figura aparecen tres curvas, correspondientes a distintas situaciones durante la emergencia. La curva superior se refiere al caso más desfavorable de no adoptar ninguna medida protectora, y une los valores medios de la dosis estimada bajo las diferentes condiciones atmosféricas posibles. Adicionalmente, se presentan los percentiles del 5 % y el 95 %, que abarcarían al 90 % de los casos. Como se aprecia, el valor medio se encuentra más próximo del percentil 95 %, y la banda de incertidumbre es más estrecha por arriba que por abajo.

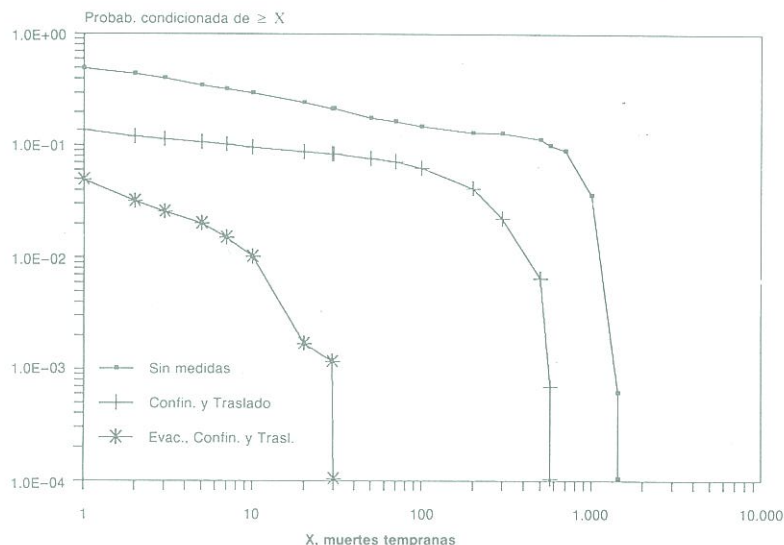
La dosis aguda total puede desglosarse entre las distintas vías de exposición, lo cual se muestra en la figura V, que indica la contribución porcentual de cada vía al total, en función de la distancia al reactor. Conviene indicar que, si bien la dosis por exposición al suelo contaminado y por inhalación de material resuspendido, dependen del período de exposición considerado (siete días), para las dosis por irradiación directa de la nube, y por inhalación de los aerosoles que ésta transporta, el período de exposición es el correspondiente al paso de la nube.

Una vez conocidas estas dosis potenciales y de dónde proceden, se podría evaluar el efecto sobre las mismas de diferentes diseños en el plan de emergencia, buscando la disminución del riesgo de aparición de daños inmediatos por debajo de límites razonables. Por ejemplo, la segunda curva de la figura IV se obtendría al suponer el confinamiento de la población hasta los 10 km de distancia, junto con el traslado posterior de los residentes en zonas donde pudiesen superarse los 500 mSv en siete días. La tercera curva se



F V Contribución de cada vía de exposición a la dosis aguda total a la médula ósea

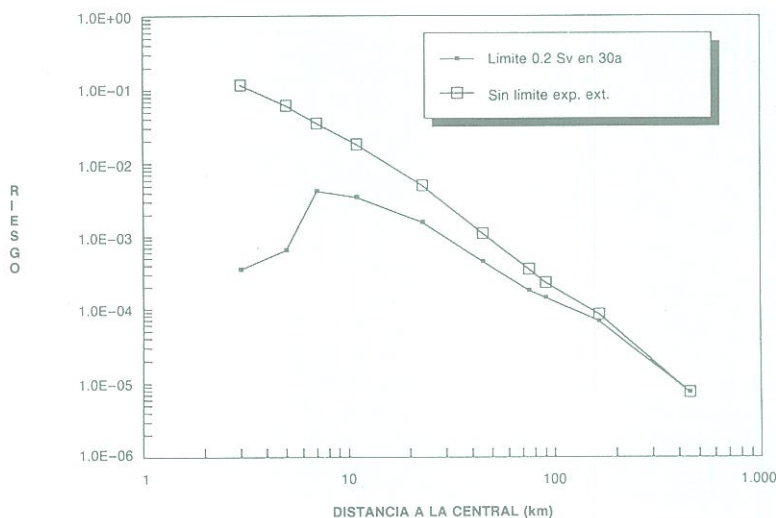
F VI Curvas del riesgo condicionado al escape relativas a muertes tempranas para tres supuestos de actuación



obtiene suponiendo adicionalmente una evacuación preventiva dentro del círculo de 5 km alrededor del reactor. Las curvas del riesgo, condicionado al escape, relativas a muertes tempranas, se muestran en la figura VI, en donde se aprecia la clara reducción en los daños potenciales al aplicar las medidas de protección, tanto en los valores de corte (probabilidad de aparición de una o más víctimas) como en los valores máximos y medios de las funciones de distribución, que toman valores de 120, 19 y 0,3, respectivamente, dando una clara medida de la eficacia de las acciones protectoras supuestas.

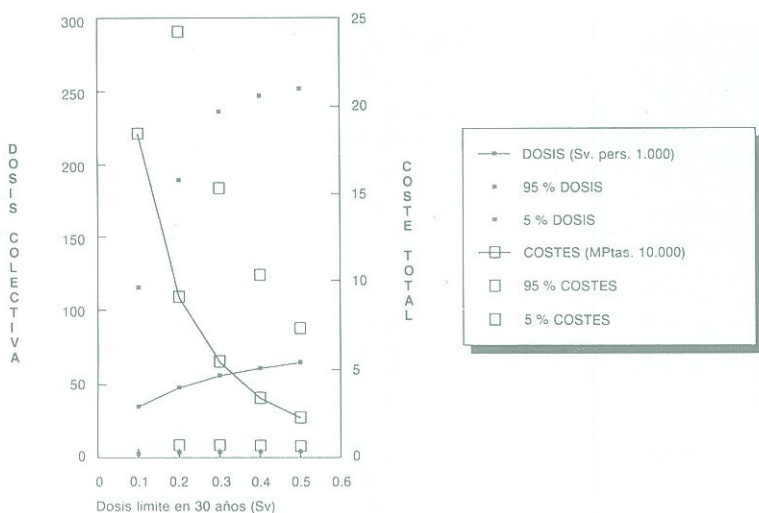
RESULTADOS PARA LA FASE DE POST-EMERGENCIA

Los modelos de ACA son excepcionalmente útiles para realizar análisis costo-efectividad de las medidas aplicables a la post-emergencia, ya que reúnen todas las relaciones necesarias para el análisis entre dosis crónicas y daños radiológicos, niveles de contaminación, áreas y poblaciones afectadas, junto con el coste de las medidas protectoras. No obstante, sólo podrá hacerse una buena estimación cuando se disponga de datos realistas y detallados sobre las actividades agropecuaria y



F VII Riesgo medio de cáncer a largo plazo, sin medidas contra la exposición directa y con un límite de 0.2 Sv (30 a)

F VIII Dosis colectiva por exposición directa y coste de las medidas de protección para distintos límites



económica en general, dentro del área afectada, así como acerca del coste de cada una de las posibles técnicas de descontaminación, su eficiencia y el esfuerzo requerido para su realización. Como ejemplo, se ilustra en la figura VII cuál sería el riesgo medio de contraer cáncer, en función de la distancia, para el mismo supuesto contemplado anteriormente. En la figura se muestra una segunda curva obtenida al suponer un límite de 0,2 Sv en treinta años, para las dosis por exposición directa a los pulmones, suma de la irradiación externa desde el suelo contaminado y de la interna por inhalación del material resuspendido en el aire. La imposición de dicho límite se traduce en una reducción muy apreciable del riesgo, a cambio de obligar a realizar importantes tareas de descontaminación y tras-

lado de las poblaciones, temporal o permanentemente, fuera de las zonas contaminadas por encima del nivel impuesto. Estas acciones causarán un perjuicio a la economía, evaluable directamente, y al bienestar de la población, más difícil de evaluar por incluir trastornos psicológicos y sociales de difícil cuantificación. El análisis costo-beneficio para las medidas de limitación de la exposición directa se muestra en la figura VIII, en donde se puede observar la variación en los costes y en las dosis colectivas, junto con sus percentiles 5 % y 95 %, para distintos criterios del límite individual de dosis a los pulmones en treinta años. Como se observa, las incertidumbres resultan muy elevadas, aunque ello no impide la posibilidad de utilizar este tipo de análisis en busca

de soluciones óptimas para el coste global del accidente a largo plazo, suma de las tres componentes radiológica, económica y social ya mencionadas.

Similares análisis podrían realizarse para otras acciones contempladas en la post-emergencia, fundamentalmente las relacionadas con el control de alimentos y leche.

DESARROLLOS EN CURSO

Dentro de la Cátedra de Tecnología Nuclear de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, integrada en el Departamento de Ingeniería Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid, como consecuencia de la experiencia acumulada en los estudios realizados, se inició en 1987 un proyecto de desarrollo de un nuevo modelo para la estimación de las consecuencias económicas, en el exterior de las centrales nucleares. El nuevo código, llamado MECA, tendrá una orientación probabilista, y podrá ser incluido como eslabón final de los Análisis Probabilistas de Seguridad, permitiendo completar dichos análisis con la estimación de los riesgos económicos. En su primera versión está siendo acoplado al código MACCS 1.4. Para estos trabajos se cuenta con el apoyo del Programa de Protección Radiológica de las Comunidades Europeas (Proyecto MARIA-2). Los modelos particulares contemplados en MECA (ref. 4) servirán para evaluar el coste ocasionado por las medidas protectoras habitualmente consideradas de cara a la reducción del daño radiológico: evacuación, traslado temporal de la población, incautación de productos agrícolas y ganaderos, descontaminación de la tierra y propiedades y, en su caso, expropiación de áreas con traslado permanente de la población. Asimismo, se incluye un modelo para estimar el coste derivado de los daños a la salud junto con las reclamaciones que pudieran presentarse.

El código hará uso de una detallada base de datos socioeconómicos, obtenidos en muchos casos a nivel municipal a partir de los distintos censos, lo que conferirá una gran validez a los resultados. El desarrollo de esta base de datos está patrocinada por el Consejo de Seguridad Nuclear mediante la concesión de una beca. Su conclusión, al igual que la del código MECA, incluyendo una primera demostración, está prevista dentro del período cubierto por el proyecto de investigación, que finaliza en junio de 1989.

Por otra parte, acaba de recibirse en la Cátedra el código alemán UFOMOD, como consecuencia de un convenio de cesión recientemente suscrito con el Centro de Investigación Nuclear de Karlsruhe (RFA). Ello ofrece la posibili-

dad de contrastar resultados entre diferentes modelos y códigos de cálculo, a fin de buscar aproximaciones mejores al problema.

CONCLUSIONES

En la exposición realizada se ha tratado de mostrar la gran utilidad de los modelos de Análisis de Consecuencias de los Accidentes (ACA), con enfoque probabilista, para la planificación de emergencias. Dicha utilidad se concreta en los siguientes puntos:

- Los modelos ACA permiten simular a priori todo el espectro de posibles escenarios accidentales, al considerar los distintos términos fuente; las diferentes condiciones atmosféricas en el emplazamiento, y las hipotéticas actuaciones de protección que sean sometidas a evaluación.
- Para la fase de emergencia, los modelos permiten comparar el efecto de distintas hipótesis de actuación sobre las dosis y los daños radiológicos de aparición temprana, con un gran nivel de detalle. Los resultados se ofrecen en forma de funciones de distribución estadística, por lo que el análisis será útil para llevar a cabo una planificación eficaz en el mayor número de casos posible.
- Para la post-emergencia, los modelos permiten desarrollar criterios de

planificación a partir de análisis costo-efectividad de las distintas opciones, a fin de optimizar las decisiones, pudiendo evaluar separadamente cada vía de exposición crónica, y cada acción de protección adecuada para limitar la contribución de la misma al riesgo de aparición de efectos latentes.

Por último, indicar que los códigos más recientes y avanzados en este campo, el MACCS estadounidense y el UFOMOD alemán, ya disponibles, están siendo complementados con nuevos desarrollos en el campo de las consecuencias económicas.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos mostrar expresamente nuestro agradecimiento a las siguientes instituciones:

- A los Laboratorios Sandía y la Nuclear Regulatory Commission de los Estados Unidos de América, por la cesión del código MACCS 1.4.
- Al centro de Investigación Nuclear de Karlsruhe (República Federal de Alemania), por la cesión del código UFOMOD.
- A la Comisión de las Comunidades Europeas, programa de Protección Radiológica, Proyecto MARIA-2, por su apoyo mediante el contrato BI6-F-227-E sobre "Off-Site Econo-

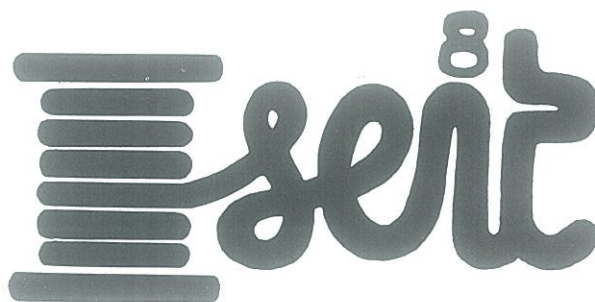
mic Consequences of Nuclear Reactor Accidents".

- Al Consejo de Seguridad Nuclear, por su apoyo al desarrollo de bases de datos socioeconómicos, mediante la concesión de una Beca.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. EHRHARDT, J.; BURKART, K.; HASEMANN, I.; MATZERATH, C.; PANITZ, H. J., y STEINHAEUER, C., *The program system UFOMOD for assessing the consequences of nuclear accidents*, KfK-4330, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1988).
2. CHANIN, D. I.; RITCHIE, L. T., y SPRUNG, J. L., *MELCOR Accident Consequence Code System (MACCS Version 1.4)*. (Draft), U. S. NRC Report NUREG/CR-4691 (SAND86-1562), Sandia National Laboratories (1987).
3. U. S. Nuclear Regulatory Commission, *Reactor Risk Reference Document*, U. S. NRC Report NUREG/1150 (1987).
4. GALLEGU, E., y ALONSO, A., *A Model for the Calculation of the Off-Site Economic Consequences of Nuclear Reactor Accidents*, In Proc. Joint CEC/OECD (NEA) Workshop on Recent Advances in Reactor Accident Consequence Assessment (Roma, 25 al 29 de enero de 1988), CEC Report EUR 11408 EN (1988).

- Equipos y componentes eléctricos y almacén de servicio para Centrales Nucleares.
- Materiales para la construcción de líneas aéreas y subterráneas y estaciones transformadoras.
- Proyectos y realización "llave en mano" de minicentrales hidráulicas"



Gerona, 151 - 1.ª Planta. Teléfono 207 46 12 (12 líneas) Télex 50.508 ATSE-E. 08037 BARCELONA
Juana Ibarbourou, 12 local 11. Teléfono 41 27 00. 50013 ZARAGOZA
Vital Aza, 26. Teléfono 407 95 62 Télex 46.087 ATSE-E. 28017 MADRID