

# Nuevo algoritmo para análisis de riesgo en radioterapia

**Antonio Torres, Joe Montes de Oca**

Instituto superior de Tecnología y Ciencias Aplicadas (InSTEC)

Ave. Salvador Allende y Luaces. La Habana, Cuba

atorres@instec.cu

## Resumen

Los análisis de riesgo aplicados a los tratamientos de radioterapia se han convertido en una necesidad innegable, partiendo de los peligros generados por la combinación del empleo de potentes campos de radiación sobre los pacientes y la ocurrencia de errores humanos y fallos de equipos durante esos tratamientos. La técnica por excelencia para llevar a cabo estos análisis ha sido la matriz de riesgo. El trabajo presenta el desarrollo de un nuevo algoritmo para ejecutar esta tarea con amplias potencialidades gráficas y analíticas, lo que lo convierte en una opción muy útil para el monitoreo del riesgo y la optimización de los programas de garantía de calidad. El sistema SECURE-MR, soporte informático de este algoritmo, se empleó con éxito en el análisis de riesgo de diversas prácticas de radioterapia. Lo distinguen nuevas posibilidades de análisis partiendo de la consideración de factores controladores del riesgo como las robusteces de frecuencia de iniciadores y de consecuencias. Sus capacidades analíticas y gráficas permiten novedosos desarrollos de ordenamiento de contribuyentes al riesgo y de representación de la información de procesos y secuencias accidentales. El trabajo muestra la aplicación del sistema propuesto a un proceso genérico de tratamiento de radioterapia con acelerador lineal.

*Palabras clave:* radioterapia; valoración del riesgo; riesgos; aceleradores lineales; garantía de calidad; algoritmos

## New algorithm for risk analysis in radiotherapy

### Abstract

Risk analyses applied to radiotherapy treatments have become an undeniable necessity, considering the dangers generated by the combination of using powerful radiation fields on patients and the occurrence of human errors and equipment failures during these treatments. The technique par excellence to execute these analyses has been the risk matrix. This paper presents the development of a new algorithm to execute the task with wide graphic and analytic potentialities, thus transforming it into a very useful option for risk monitoring and the optimization of quality assurance. The system SECURE-MR, which is the basic software of this algorithm, has been successfully used in risk analysis regarding different kinds of radiotherapies. Compared to previous methods, It offers new possibilities of analysis considering risk controlling factors as the robustness of reducers of initiators frequency and its consequences. Their analytic capacities and graphs allow novel developments to classify risk contributing factors, to represent information processes as well as accidental sequences. The paper shows the application of the proposed system to a generic process of radiotherapy treatment using a lineal accelerator.

*Key words:* radiotherapy; risk assessment; hazards; linear accelerators; quality assurance; algorithms

## Introducción

El uso de radiaciones ionizantes es una de las alternativas fundamentales para el tratamiento de enfermedades oncológicas; sin embargo, por los peligros asociados al uso estas radiaciones y las posibles sub o sobreexposición de los pacientes, así como las probables exposiciones accidentales de los trabajadores ocupacionalmente expuestos o el público, los análisis de riesgo aplicados al tratamiento de radioterapia constituyen hoy una prác-

tica común e ineludible [1-12]. Además, los expertos en el área han hallado en los análisis de riesgo un auxiliar eficaz para optimizar los niveles de calidad exigidos a las prácticas de radioterapia.

En estos análisis se han empleado diversas metodologías. Entre ellas destacan los análisis de criticidad de modos y efectos de fallos (FMECA) [5; 9,10], los análisis preliminares de riesgo (PRA) [6], los análisis probabilísticos de seguridad (PSA) [1] y el empleo de la matriz de riesgo [2,3; 8]. Como una breve síntesis [6] de las

limitaciones asociadas a estas técnicas destacan la no sistematicidad (en el caso de FMECA); una concepción difícil de aprender y un número de escenarios, descriptores del tratamiento de radioterapia, poco realistas (en el caso de PRA); la necesidad de FMECA o análisis de peligros previos (para los métodos PSA y matriz de riesgo); un lenguaje probabilista, alto nivel de expertos, herramientas informáticas complejas, dificultad para considerar los fallos de modo común (en el método PSA) y la consideración de fallos simples solamente (para los métodos FMECA y matriz de riesgo).

La metodología de análisis de riesgo que más frecuentemente utiliza la comunidad mundial es la matriz de riesgo. La base informática más difundida para aplicar esta metodología es el código SEVRRRA [7,8]. Unido a la difusión de este código se han publicado algunas bases de datos para análisis de riesgo enlazadas con las prácticas de radioterapia y braquiterapia más comunes. La sistematización de opiniones de expertos con las que se han diseñado estas bases constituye una de las más importantes contribuciones del Foro iberoamericano a estos estudios [8].

Dada la experticia necesaria para crear estas bases de datos, los estudios de riesgo realizados en muchas prácticas de radioterapia de varios hospitales [2,3; 5,7] han partido del código SEVRRRA y de esas bases como patrón de referencia, para realizar los análisis de riesgo de determinados procesos de tratamiento.

El SEVRRRA es una herramienta muy útil por su fácil asimilación para el usuario y capacidad para brindar perfiles de riesgo de un determinado servicio, así como dar recomendaciones; sin embargo, presenta limitaciones relacionadas con:

1. Poca flexibilidad para modelar configuraciones complejas que surgen a partir de variaciones de los contribuyentes a las secuencias accidentales (por ejemplo, inhabilitación simultánea de barreras y/o reductores).
2. Insuficiencia de los indicadores que contabilizan ordenamientos de contribuyentes para las necesidades posteriores de análisis.
3. Carencia de monitoreo gráfico de niveles de riesgo y estado de componentes a nivel de secuencias accidentales, etapas y procesos completos.

Estas situaciones incrementan notablemente el trabajo de los analistas involucrados en la tarea de estudio de los riesgos, su documentación y la toma de decisiones ulteriores.

Por otra parte, las capacidades de los sistemas de control de configuraciones peligrosas en centrales nucleares, por la complejidad de los esquemas monitoreados, los convierten en candidatos adecuados para salvar las limitaciones enunciadas. De hecho, algunas experiencias con matrices de dependencias [13], han mostrado la posibilidad de realizar análisis de riesgo semicuantitativos y de implementar sistemas de monitoreo de configuraciones peligrosas en centrales nucleares e instalaciones de producción de isótopos. En estos casos, la base informática es el código SECURE

Ver. 2.0, el cual tiene como aplicación de más alto nivel su uso como sistema consejero sobre riesgo en la Central Nuclear de Embalse, Argentina [14].

Utilizando como métodos, los análisis de dependencias y la matriz de riesgo, se ha propuesto un algoritmo de análisis de riesgo que resuelve las limitaciones enunciadas, el cual está soportado en el código SECURE-MR.

El objetivo del estudio es mostrar las bases del sistema de análisis de riesgo desarrollado, identificando sus potencialidades para el control de configuraciones peligrosas y sus capacidades para estudiar los complejos escenarios de riesgo presentes durante los procesos de tratamiento de radioterapia.

## Materiales y Métodos

El método "Matriz de Riesgo" ha sido aplicado ampliamente en la industria con riesgo potencial asociado (química, petrolera, etc.) en el sector bancario y crediticio, así como en distintas prácticas médicas [3,15]. Una útil y amplia información en cuanto a tratamientos de radioterapia está recogida en el IAEA TECDOC-1685 "Aplicación del método de la matriz de riesgo a la radioterapia" [2]. Esta información fue automatizada a través del software SEVRRRA, con el fin de hacer aplicable y eficaz la metodología y sus resultados. Ambos materiales se utilizaron como base y punto de partida para este trabajo, particularmente el caso de análisis de riesgo en radioterapia con acelerador lineal (LINAC).

Se utiliza como herramienta para establecer prioridades en la gestión del riesgo de una instalación a partir del análisis combinado de la frecuencia de un evento indeseado, la probabilidad de fallo de las barreras existentes y sus consecuencias. Este método, aunque no permite cuantificar el riesgo numéricamente hace posible clasificarlo en niveles, lo cual resulta suficiente para establecer prioridades, sin necesidad de análisis de riesgos más precisos pero más costosos.

Para aplicar el método es preciso evaluar cada secuencia accidental desencadenada por la ocurrencia de un determinado suceso iniciador. De esta forma, un determinado error humano o fallo de equipo (suceso iniciador), que ocurre con una frecuencia determinada ( $f$ ), puede dar lugar a consecuencias indeseadas. Existen una serie de defensas que consisten en una o varias barreras (enclavamientos, alarmas o procedimientos) capaces de detectar el problema e impedir que el suceso iniciador se convierta en un accidente. Sin embargo, es innegable una determinada probabilidad ( $P$ ) de que estas barreras fallen, en cuyo caso ocurriría el accidente, que se manifestaría con unas consecuencias determinadas ( $C$ ). En su variante más compleja esta probabilidad de fallo se evalúa en función de la combinación de sus robusteces.

La magnitud que caracteriza finalmente la secuencia accidental es el riesgo ( $R$ ), que es función de las tres variables independientes, según la siguiente ecuación.

$$R = f * P * C$$

En el método las variables no se cuantifican, sino que se clasifican en niveles. Se utilizan cuatro niveles para cada una de las variables. Las variables “frecuencia” y “probabilidad de fallo de barreras” tienen los niveles: alto (A), medio (M), bajo (B) y muy bajo (MB), mientras que la variable “consecuencias” tiene los niveles: muy alto (MA), alto (A), medio (M) y bajo (B), con lo cual se logra que la matriz de riesgo sea más conservadora en cuanto a la variable “consecuencias”. Las clasificaciones asignadas a las frecuencias y las consecuencias se pueden modificar respectivamente, en función de los reductores de frecuencia y consecuencias, los que a su vez, se evalúan en función de sus robusteces, con una metodología similar a la determinación de probabilidad de las barreras. Finalmente, como resultado de la aplicación del método, los riesgos quedan categorizados en niveles: muy alto (MA), alto (A), medio (M) y bajo (B). Ello es el resultado de la aplicación de una matriz en la cual destacan 64 combinaciones de los parámetros referidos de acuerdo con su clasificación.

Este análisis, en profundidad, se aplica a la optimización de los riesgos y a la detección de puntos débiles. Las medidas deducidas pueden incluir el rediseño de la práctica, por incorporar nuevas barreras y/o reductores, y el análisis económico de las secuencias dominantes, evaluadas por el costo de las medidas para reducir su riesgo.

El nuevo algoritmo desarrollado está informatizado a través del código SECURE, que en su versión para “Matriz de Riesgo” se denomina SECURE-MR, el cual se ha simplificado y se ilustra en la figura 1.

Como entradas del nuevo algoritmo de análisis de riesgo destacan las matrices de criterios y de dependencias. En la primera se establecen las bases (codificación) mediante las cuales se identificarán las etapas incluidas en el tratamiento, así como las cantidades de secuencias participantes, cuyo nivel de riesgo se tomará como guía para establecer el riesgo atribuido a cada etapa y al proceso. La matriz de dependencias es la base fundamental del análisis. En ella se enlazan las secuen-

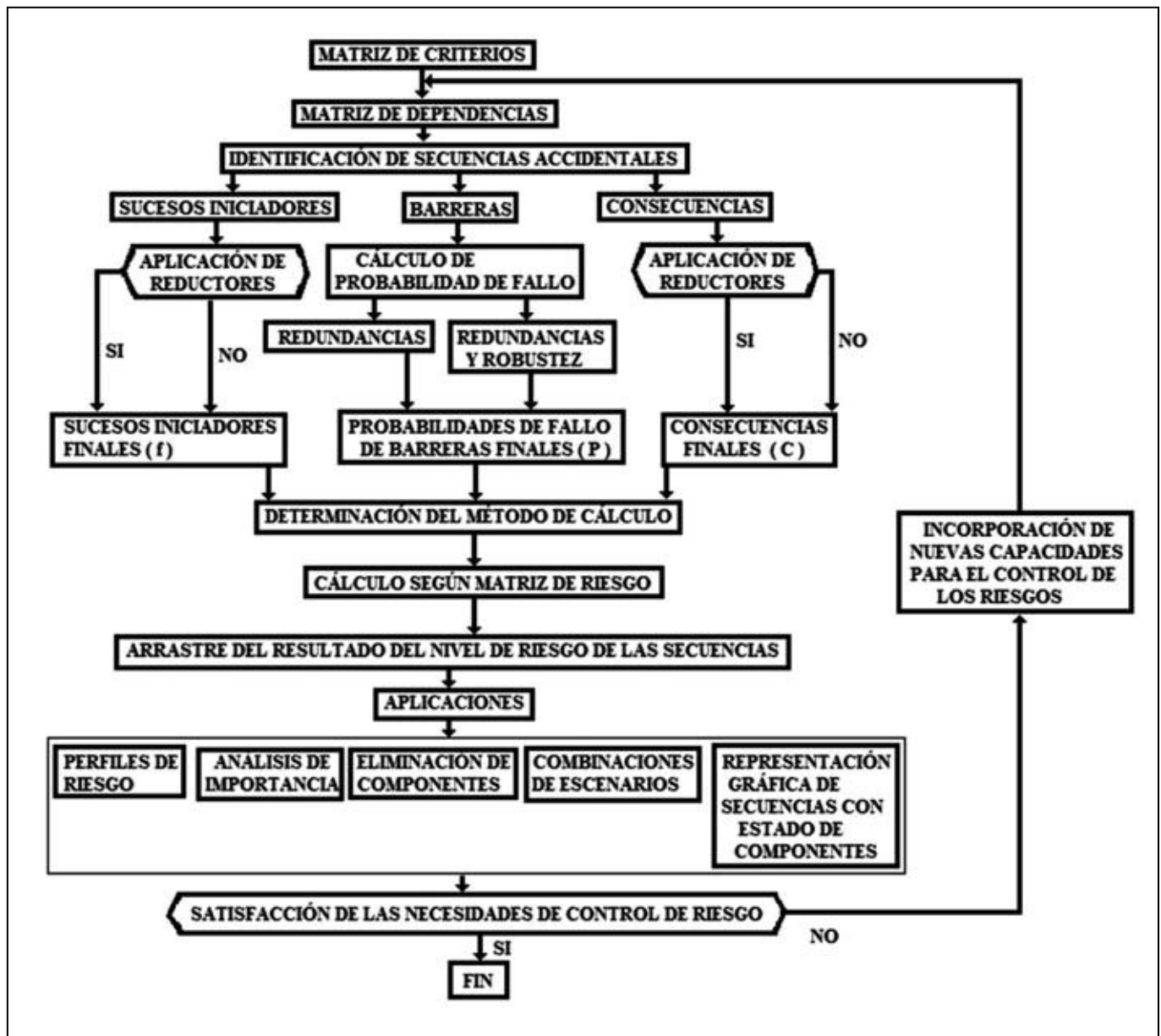


Figure 1. Algoritmo desarrollado para el análisis de riesgo.

cias accidentales con sus etapas correspondientes, y son declaradas las estructuras de las secuencias accidentales en suceso iniciador, barreras y consecuencias; se desarrollan los iniciadores con sus correspondientes reductores, las barreras con sus correspondientes redundancias y las consecuencias con sus respectivos reductores.

La matriz de criterios que representa el tratamiento de radioterapia refleja las etapas del proceso, en las cuales se toma como patrón de valoración el más alto de los riesgos alcanzado por cualquiera de las secuencias de cada etapa. La matriz de dependencias contiene 141 secuencias accidentales correspondientes a igual número de sucesos iniciadores. En la formación de las secuencias se utilizan 96 barreras, 40 reductores de frecuencia y 29 reductores de consecuencias. Estas secuencias tributan a 5 tipos de consecuencias, según la gravedad. De las 141 secuencias, 132 corresponden a efectos sobre pacientes y 9 a efectos sobre trabajadores ocupacionalmente expuestos y al público. Las 141 secuencias accidentales para este estudio de riesgo se aprecian en el Apéndice I en [2], entre las páginas 2 a 177.

En base a una estructura preestablecida, el algoritmo identifica las secuencias accidentales y a continuación, los términos que representan a los sucesos iniciadores, las barreras y las consecuencias. También por este análisis es posible conocer la presencia de reductores para los sucesos iniciadores y las consecuencias y la determinación de las probabilidades de fallo de las barreras. Los lazos que representa la aplicación de los reductores se cumplen o no en dependencia del tipo de análisis de riesgo que se desarrolle posteriormente, mientras que la determinación del mecanismo de cálculo de probabilidad de fallo de las barreras (redundancia o robustez), también dependerá del tipo de análisis de riesgo que el analista decida.

Con los valores finales del análisis de cada término de una secuencia, el algoritmo contempla diferentes métodos de determinación del riesgo, los cuales van aumentando su complejidad por la incorporación paulatina y combinada de capacidades de cuantificación que incluyen, redundancia y robustez de barreras y/o reductores.

Finalmente, las posibilidades de aplicaciones del sistema son múltiples e incluyen capacidades analíticas y gráficas. Los perfiles de riesgo se pueden representar a través de gráficos de barras, tortas o tablas analíticas, en las que es posible ordenar los contribuyentes por variados criterios. Cada método de análisis de riesgo, de los previstos en el sistema, puede aportar perfiles diferentes, los que constituyen una base de comparación muy útil, pues permiten apreciar el efecto de la incorporación paulatina de capacidades de análisis más integrales.

Como análisis de importancia destacan múltiples variantes, desde importancia estructural de los componentes hasta importancia con robustez. En los casos en que ello es posible (barreras y reductores), se definen medidas de importancia para considerar los efectos de

potenciación de cada barrera hasta su máxima robustez posible, otras para analizar su contribución al decremento de la efectividad del conjunto de barreras y reductores cuando disminuyen su robustez, y algunas para analizar directamente las cantidades de secuencias, cuyos niveles de riesgo se incrementan cuando se inhabilitan barreras o reductores, entre otras opciones. Todos estos análisis se muestran en forma de histogramas, donde se aplica el principio de Pareto [14] para priorizar las mayores contribuciones.

Por otra parte, como análisis de sensibilidad se prevén todos aquellos que el usuario demande, incluyendo la potenciación y/o degradación de barreras y reductores, considerando la combinación de factores que se desee. La eliminación de componentes permite cambiar los escenarios de riesgo, partiendo de que en estos casos se pueden repetir todos los análisis anteriores, pero considerando casos de supresión de iniciadores (secuencias), barreras y/o reductores. Una potente aplicación es la combinación de escenarios complejos que mezclan todas las potencialidades descritas.

Las secuencias accidentales, los procesos completos, las etapas y otros esquemas, se pueden convertir en mímicos, representándose el estado de cada uno de sus contribuyentes con un código de colores. Ello constituye un recurso interactivo muy útil para el analista. La realización integral de un estudio puede determinar la insuficiencia de las medidas introducidas en la práctica para el control de los riesgos. En este caso, puede ser necesario reconfigurar la matriz de dependencias, introduciendo nuevas barreras o reductores de frecuencias y/o de consecuencias, o también modificando las secuencias accidentales, inicialmente postuladas. Para estos casos se ha previsto el lazo que se muestra en la figura 1, que representa el reacondicionamiento de la matriz de dependencias para los nuevos escenarios de riesgo.

## Resultados y Discusión

Partiendo de los datos introducidos en las matrices de criterios y de dependencias, el sistema permite realizar análisis de riesgo por varios métodos. En la figura 2 se aprecian dos gráficas comparativas de resultados obtenidos por dos métodos diferentes.

Los perfiles de riesgo (parte superior) representan la distribución de los niveles de riesgos (RMA-muy alto, RA-alto, RM-medio, RB-bajo) acompañados de la composición por gravedad de consecuencias en cada nivel (MG-muy grave o alto, G-grave o alto, M-medio o moderado, B-bajo). La aplicación de métodos diversos de evaluación de riesgo permite apreciar el efecto sobre los perfiles de riesgo cuando no se consideran (izquierda) y cuando se tienen en cuenta (derecha) las robusteces de las barreras y reductores. Obsérvese cómo desaparecen los riesgos altos (RA) en el perfil derecho al aplicarse los reductores. En ambos casos se presenta (parte inferior) también la distribución de los rangos de consecuencias (sobre pacientes C-PAC, personal ocupacionalmente expuesto C-POE y público C-PUB). A

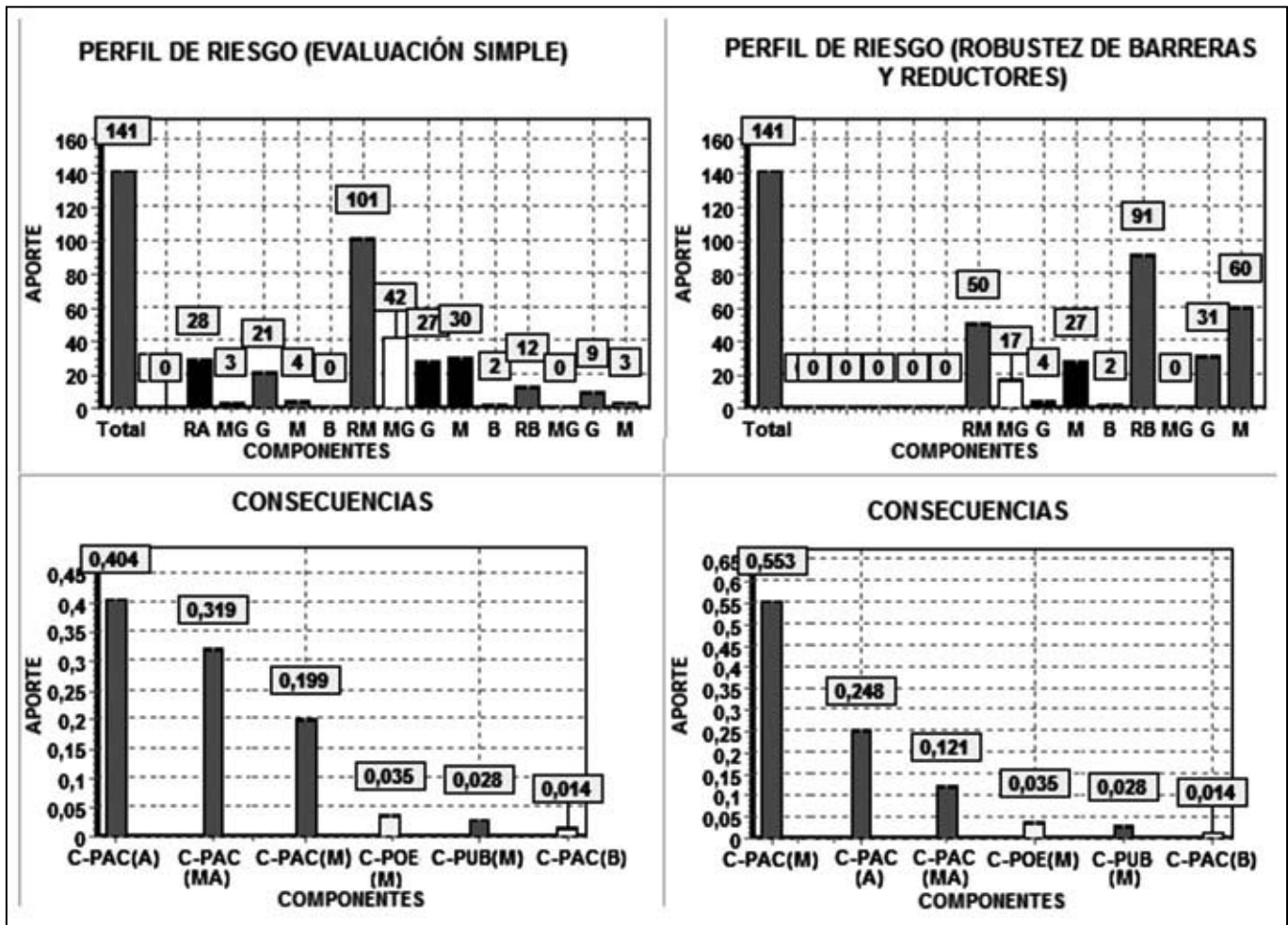


Figure 2. Perfiles de riesgo y consecuencias para los métodos "Evaluación simple" (izquierda) y "Con robustez de barreras, reductores simple" (derecha).

la izquierda, las fracciones mayores de consecuencias (gravedad) corresponden a pacientes con niveles altos {C-PAC(A)} y muy altos {C-PAC(MA)}. A la derecha, al incorporar los reductores, la fracción más importante de afectación de los pacientes pasa al rango de los valores medios {C-PAC(M)}.

Los resultados de los cálculos de riesgo a nivel de secuencias son arrastrados hacia cada una de las etapas incluidas en el análisis de riesgo del servicio de radioterapia, de manera analítica y gráfica. El mímico a

nivel de proceso (figura 3) muestra los niveles de riesgos, altos (A), medios (M) o bajos (B) para cada una de las etapas, así como el riesgo estimado para toda la práctica (LINAC). Los resultados se pueden extrapolar a mímicos de secuencias accidentales o esquemas tecnológicos enlazados a las etapas.

Como ejemplo de los análisis de importancia dentro de SECURE-MR se muestra el histograma de la figura 4, que contiene el análisis de los incrementos de los niveles de riesgo (cantidad de se-

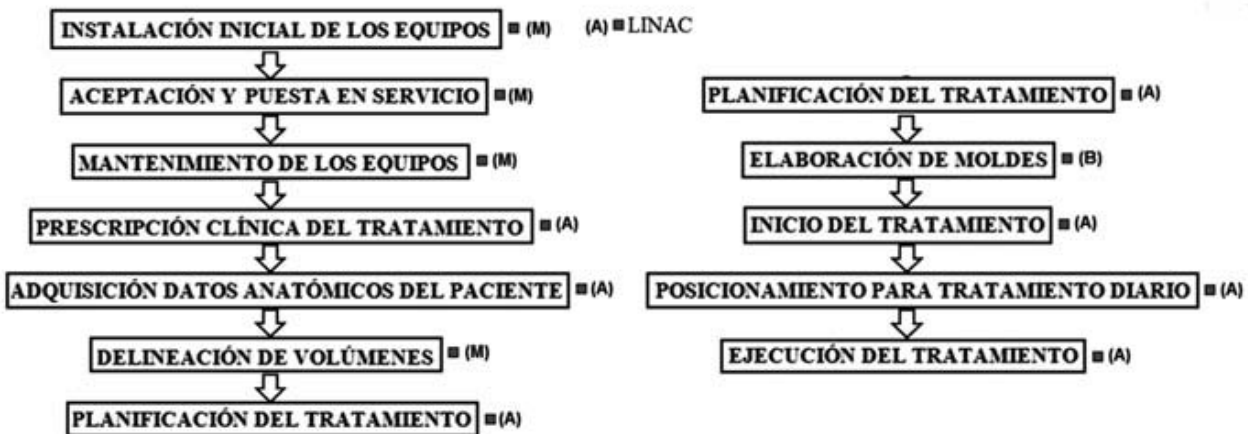


Figura 3. Representación analítica y gráfica del arrastre de resultados del análisis de riesgo desde secuencias a etapas del tratamiento.

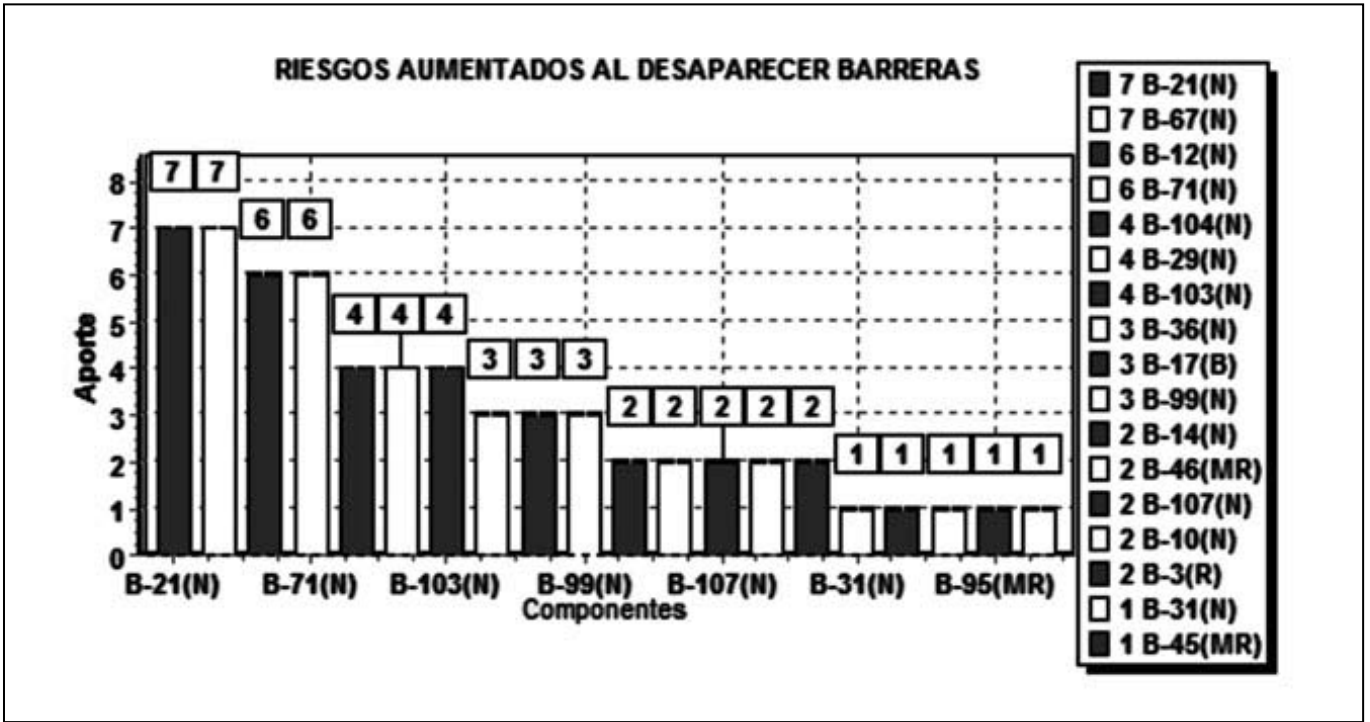


Figure 4. Distribución de barreras según el incremento de niveles de riesgo asociado a su inhabilitación.

cuencias cuyo riesgo crece) ante la inhabilitación de barreras.

En la figura 4 se aprecia la importancia diferenciada para 4 de las barreras utilizadas en el control de los riesgos en radioterapia con LINAC (B-21, B-71, B-12 y B-67). Estas barreras corresponden respectivamente, a dosimetría en vivo, imagen portal, colocación e inmovilización del paciente (todas ellas en la primera sesión del tratamiento) y evaluación del plan de tratamiento entre el radioncólogo y el físico médico. Esas barreras son determinantes en el nivel de riesgo de la práctica, ya que su ausencia produce en total 26 incrementos de riesgo en secuencias accidentales. Una potencialidad similar a la de la figura 4 se ha desarrollado para reductores de frecuencias y de consecuencias.

El sistema SECURE-MR permite además, la inhabilitación simultánea de componentes, por ejemplo, de barreras y reductores y su posterior análisis de sensibilidad. Supóngase la siguiente configuración degradada: eliminación de la barrera B-21 (dosimetría en vivo), del reductor de frecuencia RF-24 (mantener la carga de trabajo moderada) y del reductor de consecuencias RC-74 (revisión médica semanal del paciente), que constituyen los contribuyentes con más impacto al riesgo en su correspondiente categoría (barrera, reductor de frecuencia y de consecuencias) para el proceso (LINAC). El resultado del análisis para esta situación se ilustra en la figura 5.

La figura 5 muestra otra opción de salida de resultados del código; en este caso a la izquierda un perfil

Etapa	RA	RM	RB	Total
IEQ	0	2	0	2
ACP	0	12	15	27
MAN	0	2	1	3
PCT	0	0	6	6
ADA	1	5	3	9
DVO	0	0	4	4
PLT	0	9	7	16
EMO	0	0	3	3
INT	2	10	4	16
PTD	0	10	5	15
EJT	0	31	9	40
PROCESO	3	81	57	141



Figure 5. Perfil de riesgo para configuración degradada.



de riesgo en forma de tabla (niveles de riesgos distribuidos por etapas y totales para todo el PROCESO). Los códigos de las etapas corresponden, en su orden, con los bloques del flujograma de la figura 3. Este resultado se puede comparar con la parte derecha de la figura 2. Como se aprecia en la tabla de la izquierda (ver fila PROCESO), ocurre un incremento de los riesgos altos (RA) y medios (RM), como consecuencia de la configuración enunciada. La desviación también se aprecia en la distribución de consecuencias (parte derecha), donde las fracciones de consecuencias altas (A) y muy altas (MA) han aumentado. Esta posibilidad de análisis demuestra las capacidades de la herramienta para su empleo como monitor "off-line" del riesgo, ya que permite diseñar y estudiar dinámicamente, nuevos escenarios de análisis, según cambie la situación en que se ejecuta el tratamiento.

A modo de validación, se podrían ejemplificar varios casos en los que los resultados de SECURE-MR coinciden con los obtenidos en el TECDOC-1685 [2] o a través de SEVRRRA [7,8]. La figura 6 muestra una comparación de resultados para el primer cribado en el caso de LINAC (izquierda) obtenido en TECDOC-1685 [2] y su equivalente (método de evaluación simple) en

SECURE-MR (derecha). Como se aprecia en la figura, la correspondencia de resultados es total. El balance de secuencias con consecuencias graves (40 %) sobre pacientes coincide en ambos estudios, al igual que el 32 % de secuencias con consecuencias muy graves, también sobre pacientes. El 26 % de las secuencias con consecuencias moderadas, mostrados a la izquierda, se representan en la derecha con la suma de las contribuciones de las barras tercera, cuarta y quinta del histograma.

Algunos de los métodos de cálculo de riesgo, desarrollados en SECURE-MR, no tienen similar en ninguno de los códigos basados en matriz de riesgo disponibles actualmente. Esta afirmación se ilustra en la figura 7.

En el método de análisis actualmente disponible en SEVRRRA 2.0, cuyo perfil de riesgo aplicado a LINAC se ilustra a la izquierda, solo se tienen en cuenta las robusteces de las barreras y las redundancias de los reductores de frecuencia de iniciadores (no se consideran las robusteces de los reductores de frecuencia ni el efecto de los reductores de consecuencia). La incorporación de las robusteces de los reductores (de frecuencia y de consecuencias), según muestra el perfil de ries-

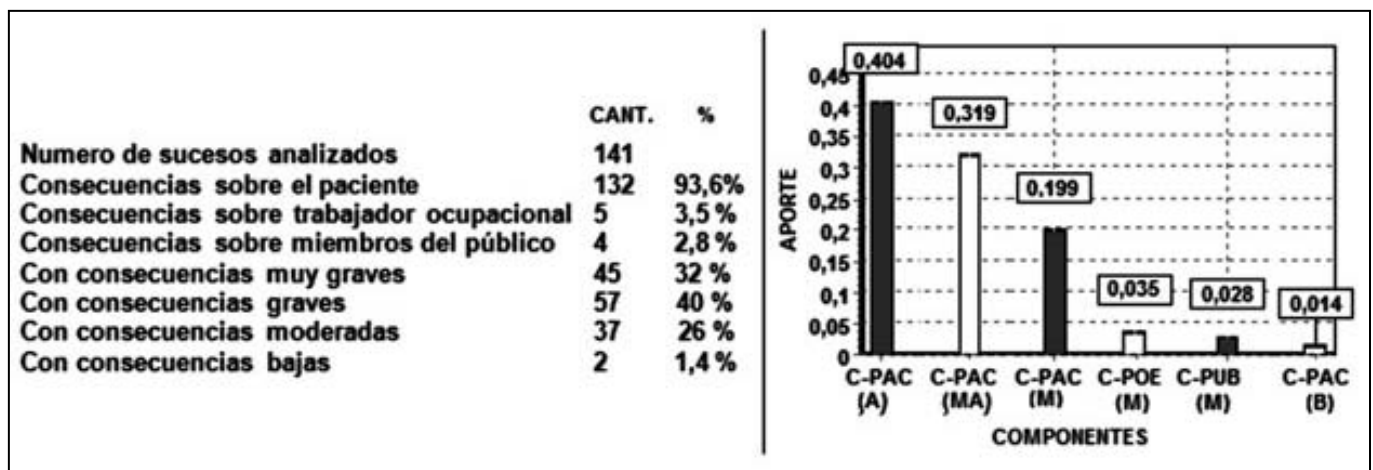


Figure 6. Comparación de resultados obtenidos para LINAC según TECDOC-1685 [2] (izquierda) y SECURE-MR (derecha).

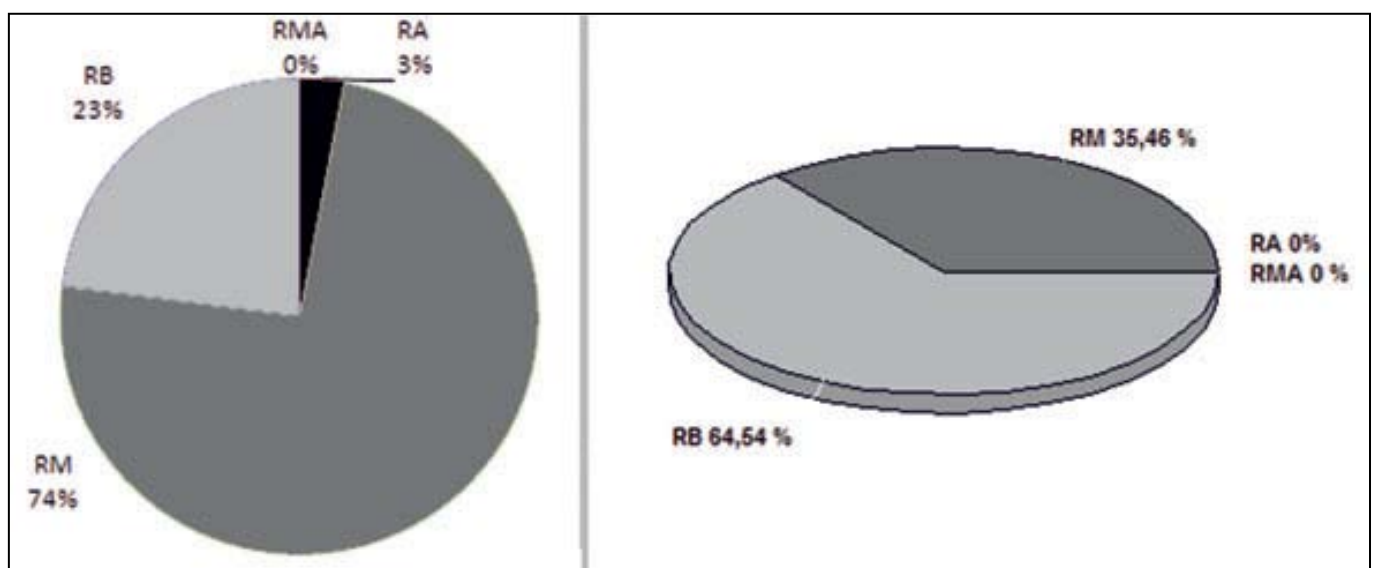


Figure 7. Comparación de resultados obtenidos para LINAC según SEVRRRA 2.0 (izquierda) y SECURE-MR (derecha).

go de la derecha, obtenido con SECURE-MR, permite conocer en toda su magnitud el impacto de estos contribuyentes en el mejoramiento del perfil de riesgo de la práctica estudiada. Como se observa en la figura 7, esta consideración de controladores del riesgo produce un desplazamiento del perfil de riesgo hacia los niveles inferiores, o sea, medios (RM) y bajos (RB). Tales capacidades resultan trascendentales para evaluar los riesgos con las variantes más optimistas de los análisis, permitiendo determinar, de forma más integral y real, la eficacia de las combinaciones de barreras y reductores en la reducción de los riesgos de las secuencias accidentales.

## Conclusiones

El trabajo muestra el desarrollo de un sistema flexible y con amplias capacidades para realizar análisis de riesgo, basado en las metodologías de "Control de Configuración" y "Matriz de Riesgo". El algoritmo propuesto resuelve las limitaciones asociadas a los sistemas de análisis basados en matriz de riesgo, actualmente disponibles. La herramienta informática que lo soporta es el código SECURE-MR. El sistema se aplicó a estudios complejos como el proceso de tratamiento de radioterapia con LINAC, demostrándose la consistencia de los resultados obtenidos mediante comparaciones con otros informes publicados.

Las capacidades desarrolladas en SECURE-MR se compararon con las del código SEVRRRA 2.0, considerado en este momento como el más avanzado y divulgado de los sistemas de análisis de riesgo (basados en matriz de riesgo). Las posibilidades de análisis del sistema propuesto incluye las previstas en SEVRRRA 2.0 como la obtención de tablas generales (figura 5), perfiles de riesgo (figura 7) y el ordenamiento estructural de contribuyentes, ya sea por barreras, reductores o consecuencias (importancia de consecuencias en figuras 2, 5 y 6). Adicionalmente, el SECURE-MR incorpora métodos más avanzados de análisis como los que consideran simultáneamente, redundancia y robusteces de barreras y reductores. Además, permite el ordenamiento de contribuyentes según principio de Pareto por múltiples variantes como contribución de robustez para barreras y reductores, impacto de eliminación de contribuyentes (figura 4) y naturaleza de los riesgos (errores humanos y fallos de equipos), entre otras. Todas estas capacidades se encuentran soportadas en amplias facilidades analíticas y de representación gráfica como perfiles de riesgo (figura 2), tortas (figura 7), histogramas (figura 4) y mímicos de procesos (figura 3), de etapas, de secuencias y de esquemas tecnológicos. La facilidad para ejecutar la inhabilitación simultánea de contribuyentes (figura 5) es otra capacidad que distingue al SECURE-MR.

Todas las posibilidades descritas tributan no solo a la ejecución del análisis de riesgo de la práctica, sino que dotan al analista de capacidades para realizar más fácilmente múltiples aplicaciones que contribuyen a la optimización y calidad del proceso de radioterapia y al monitoreo del riesgo.

## Referencias

- [1] VILARAGUT JJ, FERRO R, RODRÍGUEZ M, et. al. Análisis probabilista de seguridad (APS) del proceso de tratamiento de radioterapia con un acelerador lineal de usos médicos. Memorias del Congreso de la Asociación Internacional de Protección Radiológica (IRPA). Buenos Aires, 2008.
- [2] International Atomic Energy Agency. Aplicación del método de la matriz de riesgo a la radioterapia. IAEA-TECDOC 1685 Series. Vienna: IAEA, 2012.
- [3] VILARAGUT JJ, FERRO R & TRONCOSO M. Aplicación de matrices de riesgo para evaluar la seguridad del tratamiento con teleterapia. *Nucleus*. 2006; (39): 48-51.
- [4] International Commission on Radiological Protection (ICRP). Prevention of accidental exposure to patients undergoing radiation therapy. ICRP Publication 86. Annals of the ICRP 30 (3). Oxford: Pergamon Press, 2002.
- [5] DUMÉNIGO C, RAMÍREZ ML, ORTIZ LÓPEZ P, et. al. Risk analysis methods: their importance for the safety assessment of practices using radiation. Proceedings Congress IRPA-2008. 2008.
- [6] ACCIRAD. Patient safety in external beam radiotherapy-guidelines on risk assessment and analysis of adverse events and near misses. 2013.
- [7] DUMÉNIGO C. Accident prevention in radiotherapy. Using of the software SEVRRRA to implement the risk matrix method. Proceedings Congress IRPA-2013. 2013.
- [8] MC DONNELL J, PAPADOPULOS S, PAZ A, et. al. Aplicación de SEVRRRA para la evaluación de condiciones de riesgo en braquiterapia HDR. Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares. IRPA. Brazil, 2013.
- [9] SAWANT A, DIETERICH S, SVATOS M & KEALL P. Failure mode and effect analysis-based quality assurance for dynamic MLC tracking systems. *Med. Phys.* 2010; 37(12): 6466-6479.
- [10] HUQ MS. A method for evaluating quality assurance needs in radiation therapy. *Int. J. Radiat Oncol Biol. Phys.* 2008; 71(1 Supplement): S170-S173.
- [11] BRAY GILLEY D & HOLMBERG O. SAFRON improving safety in radiotherapy. *Medical Phys Int.* 2015; 3(1): 25-29.
- [12] KELLY KL, LEE RC, NEWCOMB C, et. al. Quantitative approaches to patient safety: research in risk analysis and risk management as applied to radiotherapy. *Radiotherapy and Oncology.* 2005; 76(Suppl. 1): S8.
- [13] TORRES A, PERDOMO M & RIVERO JJ. Matriz computarizada de principios básicos de seguridad: una alternativa útil para su enseñanza y aplicación. *Revista Ingeniería Mecánica.* 2011; 14(3): 221-229.
- [14] TORRES A & PERDOMO M. Control de configuraciones peligrosas en centrales nucleares a través de matrices de dependencia. *Nucleus.* 2010; (47): 8-15.
- [15] KOLLURU R, BARTSELL S, PITBLADO R & STRICOFF S. Risk assessment and management handbook. New York: McGraw-Hill, 1996.

**Recibido:** 22 de julio de 2015

**Aceptado:** 27 de noviembre de 2015