

Proyecciones

Volumen 7

Número 1

Abril, 2009

Publicación de la Facultad Regional Buenos Aires

Director
Dr. Isaac Marcos Cohen

Comité Editorial
Lic. Gladys Esperanza, Facultad Regional Buenos Aires
Lic. Juan Miguel Languasco, Facultad Regional Buenos Aires
Dr. Isaac Marcos Cohen, Facultad Regional Buenos Aires

Colaboración Técnica
Ing. Marisa Arrondo

Diseño y Diagramación
Marcela Laura Ferritto, Facultad Regional Buenos Aires

Propietario
Facultad Regional Buenos Aires
Medrano 951 (C1179AAQ)
Buenos Aires, República Argentina

ISSN 1667-8400
Registro de la
Propiedad
Intelectual
No. 692929

 **Universidad Tecnológica Nacional**

Proyecciones

Volumen 7

Número 1

Abril, 2009

Publicación de la Facultad Regional Buenos Aires

Proyecciones es una publicación semestral, destinada a la difusión de trabajos originados en las tesis desarrolladas en el ámbito de las carreras de posgrado que se dictan en la Facultad Regional Buenos Aires, así como de otros trabajos originales de investigación en el campo de la ingeniería, en todas sus ramas, de su enseñanza y de las ciencias conexas. Eventualmente son aceptadas también obras de revisión en temas específicos.

La información contenida en los artículos, así como las opiniones y los juicios vertidos, reflejan la creación y el pensamiento de los autores y no constituyen toma de posición o expresión por parte del Comité Editorial o de la Facultad Regional Buenos Aires.

Se permite la reproducción total o parcial de los artículos publicados en Proyecciones, con expresa mención de la fuente y autorización de la Dirección.

INDICE

- 5 **Editorial**
- 7 **Presentación**
- 9 **La aplicación del Capability Maturity Model en empresas de software de Argentina**
Oscar Eduardo Cumpe
- 19 **Impregnación de durmientes de quebracho blanco (Aspidosperma quebracho blanco) con preservadores cromocuproarsenicales (CCA)**
Damián Gherscovic, Zulma Cataldi, Juan Miguel Languasco
- 37 **Caracterización radiológica de una instalación relevante**
Claudia M. Barberis
- 49 **De la primera radiografía al primer tomógrafo por emisión de positrones argentino**
Claudio Verrastro, Martín Belzunce, Juan Carlos Gomez, Daniel Estryk, Esteban Venialgo, Fernando Carmona, Damián De Biase
- 65 **Estudio sobre la factibilidad de empleo del análisis por activación neutrónica en cerámicos arqueológicos enteros – Parte 1: Aspectos de precisión de resultados y de seguridad radiológica del proceso**
Patricia Bedregal, Marco Munive, Patricia Mendoza, Angel Revilla, Javier Gago, Isaac M. Cohen, Eduardo Montoya

Editorial

Desde una práctica impuesta en algunos casos hace más de cien años, nos hemos acostumbrado a que en diversos escenarios se diriman periódicamente, entre banderas e himnos, contiendas deportivas internacionales.

Juegos olímpicos, Copa Davis, campeonatos mundiales, todos ellos sostenidos por una profusa publicidad, atrapan la atención de un público muchas veces convencido de que los propios valores de cada país (ser nacional, honor u orgullo) se están poniendo en juego a través de los torneos.

La ciencia registra también pleitos no formales donde la nacionalidad aparece vinculada a las concepciones formales. A modo de ejemplo, podemos citar la controversia entre científicos alemanes e ingleses, en la segunda mitad del siglo XIX, acerca de la naturaleza de los rayos catódicos.

Es posible que en su momento cada sector haya visto con preocupación los hechos experimentales que tendían a robustecer la posición del otro, embarcados como lo estaban en tal competencia. Sin embargo, al terminar la polémica nadie propuso cambios en la conducción o en la integración de los grupos profesionales ni mucho menos en la forma de investigación. Ningún medio de difusión hizo referencias, según el caso, a “triumfo resonante” o “catastrófica derrota” y la humanidad, en su conjunto, recibió los beneficios de descubrimientos trascendentes (entre otros, de los rayos X y de la existencia del electrón) aportados respectivamente desde ambos países.

Tampoco la tecnología escapa a la consideración de la nacionalidad: ambos conceptos se asocian frecuentemente, en general como sinónimos implícitos de calidad y confiabilidad. Baste pensar en la influencia de estas ideas, por ejemplo en la elección de los artículos que nos acompañan en la vida cotidiana, para comprender la importancia de esa conexión.

Si pensamos que los auténticos valores nacionales no descansan en victorias circunstanciales ni desaparecen en derrotas eventuales, deberíamos asimismo recordar que nunca se pierde al invertir en investigación científica y tecnológica. Aquellos países que lo han entendido cabalmente no necesitan de un golpe de fortuna para cimentar la felicidad de su población.

Luis Ángel De Marco
Decano

Presentación

Este número se inicia con “La aplicación del Capability Maturity Model en empresas de software de Argentina”, un artículo basado en la tesis presentada por O. E. Cumpe. El mismo tiene como objetivo establecer el marco conceptual para la aplicación del Modelo de Capacidad de Madurez en empresas de software de Argentina. Como su autor lo indica, se trata de un nuevo enfoque que permite gestionar la maduración de los proyectos de software y de una metodología que establece un lenguaje común en la organización, que hace posible construir un conjunto amplio de procesos y prácticas de desarrollo, proveer un marco de trabajo para priorizar acciones y efectuar presupuestos confiables y consistentes.

Le sigue el aporte de los autores D. Gherscovic, Z. Cataldi y J.M. Languasco, basado en una tesis presentada en nuestra Facultad, donde se analiza un problema de infraestructura que se manifiesta actualmente en los ferrocarriles argentinos, tal como lo es el del reemplazo de los durmientes de madera. La impregnación de durmientes de quebracho blanco con sales hidrosolubles es relativamente reciente en Argentina y el problema radica en que aún no ha sido optimizado el proceso de producción. En el presente trabajo se analiza la influencia de las variaciones de presiones de tratamiento en el método de impregnación. Se titula “Impregnación de durmientes de quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho blanco*) con preservadores cromocuproarsenicales (CCA)”

A continuación se presenta el trabajo “Caracterización radiológica de una instalación relevante” cuyo autor es C. M. Barberis. El objetivo de este trabajo es efectuar la caracterización radiológica de una instalación nuclear, el reactor nuclear RA-1, para así conocer la información sobre los radionucleidos presentes y de esta forma establecer el orden de magnitud de las actividades que estarán involucradas en la remoción de los distintos materiales, en el momento en que se decida llevar a cabo su clausura.

El siguiente trabajo describe los requerimientos de diseño del primer tomógrafo por emisión de positrones (PET) actualmente en desarrollo en la Argentina, que tiende a paliar una situación desfavorable, en relación con el alto costo de estos equipos, importados en su totalidad, al que se suman los problemas de mantenimiento, muchas veces ineficiente y dependiente de servicios que no se encuentran disponibles en el país. Se titula “De la primera radiografía al primer tomógrafo por emisión de positrones argentino” y son sus autores C. Verrastro, M. Belzunce, J. C. Gomez, D. Estryk, E. Venialgo, F.Carmona y D. De Biase.

Finalmente se presenta un trabajo que trata un problema enteramente novedoso, que es el análisis de objetos cerámicos enteros. Su realización es muy compleja, puesto que están involucrados factores tales como las formas asimétricas y variables de los objetos, a las que se suman sus masas relativamente altas. Se han tomado en cuenta los elementos químicos relevantes para las investigaciones arqueológicas, así como el grado de exactitud requerido. Este trabajo, denominado “Estudio sobre la factibilidad de empleo del análisis por activación neutrónica en cerámicos arqueológicos enteros – Parte 1: Aspectos de precisión de resultados y de seguridad radiológica del proceso” fue realizado por P. Bedregal, M. Munive, P. Mendoza, A. Revilla, J. Gago, I. M. Cohen y E. Montoya.

Agradecemos a los colaboradores que nos brindan su esfuerzo aportando este material de alta calidad, así como a los lectores que con su interés permanente nos impulsan a continuar en la difusión de los trabajos de investigación y del posgrado.

Ing. Ricardo Bosco
Secretario Académico y de Planeamiento

La aplicación del Capability Maturity Model en empresas de software de Argentina

Oscar Eduardo Cumpe

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Escuela de Posgrado.
Avenida Medrano 951, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, C1179AAQ, República Argentina
ocumpe@yahoo.com.ar

Recibido el 7 de mayo de 2007; aceptado, en versión revisada, el 8 de septiembre de 2008

Resumen

El objetivo de este trabajo es establecer el marco conceptual para la aplicación del Modelo de Capacidad de Madurez (CMM, por sus siglas en inglés) en empresas de software de Argentina, por medio de su interpretación teórica y la evaluación de los resultados alcanzados por su aplicación exitosa en empresas corporativas de otros países. Se plantea como hipótesis que, a través del entendimiento conceptual del modelo y el análisis de los resultados de su aplicación en empresas corporativas, es viable su aplicación en nuestro país con similares resultados. Metodológicamente, se propone la utilización del método inductivo a partir del análisis de casos particulares, de los cuales se extraen conclusiones de carácter general. Se utiliza una muestra que se compone de: a) encuesta y relevamiento sobre 500 empresas (fuente CESSI); b) relevamiento de datos existentes en empresas corporativas (fuentes varias). Se completa el trabajo con la descripción completa del aplicativo "CMM'S Tool".

PALABRAS CLAVES: REUTILIZACIÓN DE SOFTWARE, CALIDAD DE SOFTWARE, MEDICIÓN EN INGENIERÍA DE SOFTWARE, RELACIONES COSTO-VOLUMEN-UTILIDAD, TRABAJO DE REINGENIERÍA.

Abstract

The main objective of this work is to establish the conceptual frame for the application of the Capability Maturity Model (CMM) in software companies of Argentina, through its theoretical interpretation and the assessment of the results by its successful application in corporative companies of other countries. The hypothesis formulates that, from the conceptual understanding of the model and the analysis of the results of its application in corporative companies, its application in our country is highly viable, with similar results. Methodologically, an inductive method is used: from the analysis of particular cases, general conclusions are drawn. A sample is used for the inference, consisting of: a) a survey on 500 companies (source CESSI); b) a survey on existing data in corporative companies (different sources). The work is completed with a whole description of the "CMM'S Tool" software application.

KEYWORDS: MANAGING SOFTWARE REUSE, SOFTWARE QUALITY, SOFTWARE ENGINEERING MEASUREMENT, COST-VOLUME PROFIT RELATIONSHIPS, REENGINEERING WORK

Introducción

Se da cuenta en el presente trabajo de un nuevo enfoque integral, sistemático, disciplinado y cuantitativo, que permite gestionar la maduración de los proyectos de software, y de una metodología que establece un lenguaje común en la organización y que hace posible construir un conjunto amplio de procesos y prácticas de desarrollo, proveer un marco de trabajo para priorizar acciones y efectuar presupuestos confiables y consistentes. Otras contribuciones de importancia son: mejora en la reducción del tiempo de ciclo, aumento de la productividad, calidad y recuperación de la inversión, y a la vez brindar criterios de auto evaluación y mejoramiento continuo, que permiten alcanzar la madurez en el proceso organizacional.

Para lograr los beneficios antes enunciados, es necesario en primer lugar que la dirección de la organización comprenda e internalice que mejores prácticas se transforman en definitiva en mayores beneficios, que se reflejarán en los números y por lo tanto en la rentabilidad sobre la inversión. Logrado esto, es necesario que se adopte un modelo o una estructura de trabajo tendiente a alcanzar un proceso mejorado.

Debido a la explosión de las tecnologías de procesamiento de información y a la globalización que permite el auge de usuarios más informados, es cada vez más demandado un desarrollo de herramientas que den garantías de calidad. También es cada vez más apreciado por los usuarios de sistemas de información el saber reconocer cuando se está frente a un desarrollo que satisfaga requisitos mínimos de calidad y que permita ahorrar recursos en tiempo y costo.

Al respecto, la diversa información reunida en el desarrollo de este trabajo demuestra que en nuestro país la situación está en niveles iniciales. Sin embargo, también comprueba que, afortunadamente, existe preocupación en la materia y que habría una cantidad de empresas que se han ubicado alrededor de la necesidad de tener un proceso de desarrollo de software que provea un camino de mejora en el desempeño de la organización.

Todas las personas que se han enfrentado al desarrollo de productos de software, o bien los clientes que los solicitan, se han planteado cuánto dinero les costará hacerlo, cuánto dine-

ro están perdiendo por malas estimaciones en los proyectos de desarrollo de software, o si se están desarrollando o requiriendo las aplicaciones que realmente se necesitan. Es decir, existe incertidumbre alrededor del proceso de desarrollo; es difícil predecir, difícil imaginar qué se necesita, en recursos, tiempo y dinero, y cual será el producto final obtenido.

Hace ya mucho tiempo, y muy especialmente desde el advenimiento de la Ingeniería de Software, que este proceso dejó de ser una actividad basada en la intuición, la inspiración y la experiencia de algunos iluminados. Ésta debe ser hoy una actividad que se debe regir por los criterios y la rigurosidad de una disciplina como lo es la ingeniería. Por lo tanto, la aplicación de métodos, procedimientos y herramientas debe ser una constante para obtener los resultados esperados y, desde un punto de vista económico, proveer los adecuados retornos a las inversiones hechas en este campo. No hay por ahora otro camino conocido para asegurar algún grado de éxito en el proceso de desarrollo de software. Profesionalizar no significa solamente contar con profesionales con estudios formales en el área, sino que dichos profesionales se comporten como tales y pongan en práctica métodos, procedimientos y herramientas que la ingeniería de software y la tecnología actual ponen a nuestro alcance.

La alta gerencia de las organizaciones debe preocuparse de que los métodos y los procedimientos para el proceso de desarrollo de sistemas de información al menos existan, sean formales y se apliquen en cada uno de los proyectos que se llevan a cabo, ya sea que se desarrollen internamente o que se le contraten a terceros. No se conoce por ahora otra forma de asegurar, por ejemplo, un cierto nivel de calidad en el software producido.

Actualmente, el proceso de desarrollo que incluye un conjunto de actividades, métodos, prácticas y transformaciones para desarrollar y mantener software y sus productos asociados, tales como planificación del proyecto, diseño de documentos, código, casos y manuales de usuarios, está centrado sólo en el producto, con lo cual se pierde la visión de cómo hacerlo bien. Cambiar el enfoque hacia el proceso permite predecir sus salidas y las características del producto y proyectar tendencias.

Mejorar en el proceso de software asegura mejoras cuantificables del producto de software. En consecuencia, se puede afirmar que un proceso de software mejorado implica un proceso y un producto de software mejorado. Una organización madura logrará incrementar la visibilidad del desempeño del proyecto, su calidad, la predicción de sus resultados, su habilidad para manejar complejidades y, finalmente, el ánimo del equipo de desarrollo.

En Argentina existe materia prima que muchos países no poseen: personas con excelentes aptitudes para el desarrollo de alta tecnología, que buscarán mejores horizontes a medida que las diferencias entre el contexto nacional y el exterior se hagan mayores, no sólo económicamente, sino también profesionalmente.

Las condiciones existen, y con creatividad, innovación, énfasis en la calidad y voluntad de cambio es posible avanzar y exportar productos y servicios de software al resto del mundo. Argentina, tanto en el ámbito público como en el privado, debe decidir pro activamente, si quiere jugar un rol relevante dentro de la alta tecnología, o continuar siendo un seguidor de las tendencias mundiales y renegar crónicamente de su destino.

Desarrollo

A principios de la década del 80, una firma dedicada al estudio del mercado de Tecnologías de Información (The Standish Group, 2003) publica un informe sobre el éxito de los proyectos de desarrollo en la industria del software. El reporte, basado en encuestas hechas sobre proyectos de software, informaba los siguientes resultados estadísticos:

El 30 % de los proyectos se cancelaba.

El 54 % de los proyectos excedía ampliamente los tiempos y los costos estimados.

El 16 % de los proyectos finalizaba exitosamente dentro del tiempo, el costo y la funcionalidad prevista.

En respuesta a la situación alarmante del momento, el Departamento de Defensa de los EEUU funda el SEI (*Software Engineering Institute*) (SEIR, 2003) en la Carnegie Mellon University, con el propósito de estudiar el proble-

ma y encontrar alguna solución.

En 1991, el SEI publica el modelo CMM (*Capability Maturity Model*) (CMM, 1991). El modelo está orientado a la mejora de los procesos relacionados con el desarrollo de software, para lo cual contempla las consideradas mejores prácticas de ingeniería de software y de gerenciamiento.

A partir de ese momento, el Departamento de Defensa exige que sus proveedores estén certificados en CMM, lo que impulsa a que el modelo tenga una amplia aceptación y se convierta en un estándar de facto dentro de la industria del software.

El modelo CMM original define cinco niveles de madurez dentro de los cuales se puede encontrar una organización:

Nivel 1 – *Inicial*: el proceso de software es impredecible, sin control y reactivo. El éxito de los proyectos depende del talento de los individuos.

Nivel 2 – *Repetible*: existen procesos básicos de gestión de proyectos (costo, calendario, funcionalidad). Los procesos existentes hacen que se puedan repetir éxitos en proyectos de similares características.

Nivel 3 – *Definido*: existe un proceso de software documentado y estandarizado dentro de la organización. Todos los proyectos utilizan una versión a medida del proceso.

Nivel 4 – *Manejado*: la organización recolecta métricas del proceso software y de los productos desarrollados. Tanto el proceso como los productos se entienden y controlan cuantitativamente.

Nivel 5 – *Optimizante*: existe una mejora continua del proceso software, basada en la realimentación cuantitativa del proceso y en la puesta en práctica de ideas y tecnologías innovadoras.

De acuerdo al modelo, el desempeño en general de una organización mejora notablemente a medida que incrementa su nivel de madurez. La Figura 1 muestra de manera conceptual las mejoras en el desempeño para cada nivel, contemplando los factores Tiempo y

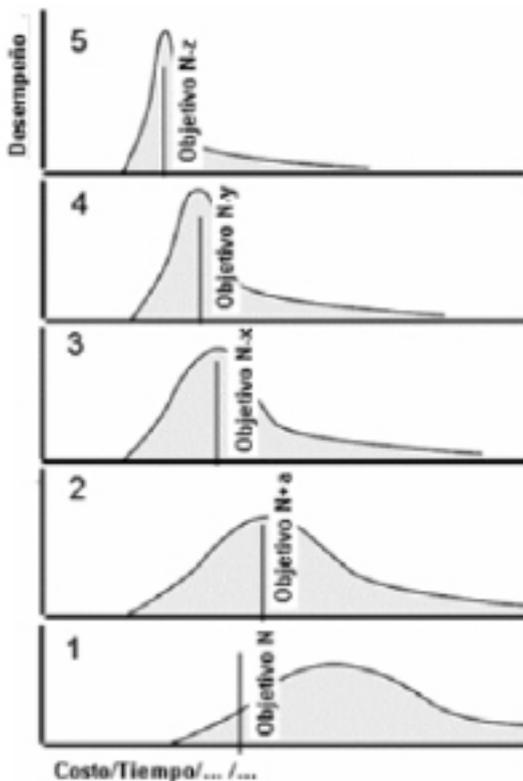


Figura 1: Variación del desempeño con respecto a los objetivos fijados para los factores costo y tiempo, de acuerdo al nivel de CMM de la organización.

Costo (CMM, 1993). Conclusiones similares se pueden extraer para otros factores, como la Funcionalidad y la Calidad.

En la misma se puede observar lo siguiente:

En las organizaciones que se encuentran en el nivel 1, los objetivos son generalmente ampliamente excedidos por la realidad.

En las organizaciones que se encuentran en el nivel 2, se establecen objetivos más acordes a la realidad.

En las organizaciones que se encuentran los niveles 3, 4, y 5, existe una menor dispersión de la realidad con respecto a los objetivos, y el desempeño mejora con cada nivel.

Algunas de las organizaciones que adoptaron el modelo, entre muchas otras, fueron (SEI, 2003): Accenture, AT&T, Boeing, Ericsson, Fuji Xerox, Hewlett Packard, Hyundai, IBM, Motorola, Nasa, NCR, NEC, PriceWaterhouseCoopers, Samsung, Siemens y United Airlines.

Luego del éxito alcanzado por CMM, el SEI desarrolló modelos similares para otras disciplinas

entre las cuales figuraban la ingeniería de sistemas, la adquisición de software, las personas, y el desarrollo integrado de productos (CMMS, 2003).

A mediados de la década del 90, el SEI decide unificar todos los modelos, embarcándose en un esfuerzo que culmina en el año 2002, dando origen a una nueva generación llamada CMMI (*Capability Maturity Model Integration*) (CMMI, 2002).

El nuevo modelo CMMI brinda un marco con una estructura común para todas las disciplinas (ingeniería de software, ingeniería de sistemas, desarrollo integrado de productos, adquisición de productos, personas) y agrega una nueva forma de representación, además de la conocida representación por niveles. La nueva forma de representación se llama *Continua* y está orientada a medir la mejora en los procesos de manera individual, en vez de hacerlo de manera conjunta como en la representación por niveles (CMMI, 2002).

Dentro de esta nueva generación de modelos, el sucesor directo del CMM original es el denominado CMMI-SW (CMMI-SW, 2002). Este modelo presenta una mayor cobertura con respecto a las áreas de proceso, y agrega el concepto de representación continua.

En paralelo con el desarrollo de CMMI, el SEI elaboró un método para la evaluación formal del modelo denominado SCAMPI (*Standard CMMI Appraisal Method for Process Improvement*; SCAMPI, 2001). El método define una serie de reglas para la evaluación del modelo, las cuales deben utilizarse para valorar las distintas partes del mismo durante una evaluación formal. Estas reglas hacen que sea necesario utilizar herramientas, ya que el método deja de ser una simple encuesta para convertirse en una evaluación detallada y casi matemática.

La situación actual con respecto a los modelos es la siguiente:

El SEI planea discontinuar el modelo CMM (SW-CMM) original en diciembre del 2003, para lo cual sugiere a todas las organizaciones certificadas migrar a CMMI-SW.

Las grandes organizaciones certificadas en SW-CMM planean migrar a CMMI-SW.

Muchas organizaciones pequeñas planean certificarse en CMMI-SW, con el fin de poder acceder al mercado de las exportaciones.

La preparación previa a la certificación CMMI-SW es larga y costosa, por lo que las organizaciones utilizan el concepto de "evaluación interna" como paso preparatorio.

Una evaluación interna es algo difícil de llevar a cabo para las organizaciones recién iniciadas en el tema, y no existe un soporte adecuado de herramientas que le faciliten el camino.

En síntesis, el nuevo modelo trae aparejado un problema no trivial para las organizaciones, en lo referente a costos y tiempos necesarios para la preparación previa a su adopción o a una certificación. El problema se ve más acentuado en las organizaciones pequeñas, donde los recursos económicos, humanos y temporales suelen ser menores que en las grandes organizaciones.

En este sentido, sería deseable contar con una herramienta que asista a las organizaciones en la conducción de una evaluación interna, indicando paso a paso los aspectos del modelo CMMI y los cuatro criterios de evaluación del método SCAMPI, de manera de disminuir los costos y tiempos necesarios para la preparación previa a una certificación.

Existen actualmente tres herramientas de evaluación para CMMI:

- CMM-Quest: permite efectuar evaluaciones de acuerdo al modelo CMMI-SE/SW en su representación continua. La evaluación se limita a asignar valores a los objetivos; no permite evaluaciones a nivel de prácticas (por debajo del nivel de los objetivos). No brinda soporte para el método SCAMPI (CMM-Quest, 2001).

- IME Toolkit: permite efectuar evaluaciones de acuerdo al modelo CMMI-SE/SW. Las evaluaciones consisten en asignar valores numéricos a las prácticas, sobre cuya base la herramienta genera puntajes para las áreas de proceso. No brinda soporte para el método SCAMPI. No posee guías de asistencia para la evaluación (IME Toolkit, 2003).

- Appraisal Wizard: soporta evaluaciones para gran parte de los modelos CMM y los métodos de evaluación propuestos por el SEI a lo largo de la historia (entre ellos, todos los CMMI y SCAMPI). Está pensada para cubrir todas las necesidades del método SCAMPI, requiriendo amplios conocimientos del mismo por parte del usuario. Requiere que éste ingrese todos los valores que se asignan en las distintas instancias de evaluación (prácticas, objetivos, áreas de proceso) y no cuenta con la capacidad de sugerir valores facilitando las tareas de ingreso de datos. Al brindar un soporte tan amplio y detallado, la herramienta no es para nada sencilla de utilizar (Appraisal Wizard, 2003).

La Tabla 1 muestra en forma comparativa las características de estas herramientas.

Tabla 1. Características de herramientas

Particularidad	CMM-Quest	IME Toolkit	Appraisal Wizard
Interfaz de usuario	Fácil, muy amigable	Medianamente amigable	Difícil, poco amigable
Tipo de usuario	Novato	Experto	Experto
Modelos soportados	CMMI-SE/SW (representación continua)	Esta basada en CMMI-SE/SW, no lo soporta formalmente	Gran parte de los CMM y todos los CMMI (ambas representaciones)
Método SCAMPI	No	No	Sí
Nivel de granularidad	Grueso (solo objetivos)	Fino (hasta prácticas específicas)	Fino (hasta prácticas específicas)
Ayudas online	Sí	No	Sí
Navegación de la estructura del modelo	No	No	No
Generación de valores sugeridos	No	Sí	No
Selección del nivel de granularidad para la evaluación	No	No	No

De la tabla anterior se desprende que existe un área no soportada por las herramientas existentes, conformada principalmente por características orientadas a los usuarios novatos, como la navegación de la estructura del modelo, las guías paso a paso, la generación automática de valoraciones, y la selección del nivel de granularidad para la evaluación.

La preparación que debe llevar a cabo una organización como paso previo a la adopción del modelo CMMI-SW o a su certificación es un proceso largo, costoso, y requiere de recursos humanos altamente capacitados. Normalmente, las organizaciones llevan a cabo una evaluación interna como parte del proceso de preparación.

En la actualidad no existen herramientas que brinden un soporte adecuado para la conducción de evaluaciones internas basadas en el método de evaluación SCAMPI (SCAMPI, 2001). Las herramientas existentes o bien son demasiado informales y no soportan el método (CMM-Quest, 2001; IME Toolkit, 2003), o bien están orientadas a usuarios profesionales y no resultan amigables a los usuarios novatos (Appraisal Wizard, 2003).

Aplicativo "CMM'S Tool"

El aplicativo permitirá a cualquier organización, empresa o usuario tener los siguientes beneficios directos:

- Autocalificarse en el modelo CMM
- Recorrer el modelo CMM (simplificado) con ayuda de búsqueda específica
- Efectuar búsqueda de terminología y definiciones específica de procesos y calidad total
- Interrelacionarse con páginas WEB determinadas por el usuario
- Disponer de una ayuda permanente en el uso del aplicativo

Los beneficios indirectos son:

- Establecer, con base en las calificaciones del modelo, planes de mejora a través del análisis de los resultados de la matriz Importancia-Desempeño por área clave
- Monitorear el compromiso del equipo de Dirección
- Identificar rápidamente fortalezas y debilidades a través de la configuración del front-end.²

¹ Granularidad se refiere a la especificidad con la que se define un nivel de detalle. En jerarquías se empieza por la parte más alta, siendo la granularidad mínima el nivel más bajo.

² El front-end es la parte del software que interactúa con el o los usuarios.

³ En la terminología de sistemas se suele utilizar la palabra "matcheo"

En la Figura 2 se muestra un diagrama del aplicativo.



Figura 2: Diagrama general del aplicativo desarrollado.

Leguaje de programación: Delphi 5.

Componentes adicionales: Companion Tools.

Base de Datos: Componentes ClientDataSet.

Se diseñó un sistema modular cuyo detalle es el siguiente:

a) Informatización de un resumen del modelo CMM que abarque sus distintos niveles, áreas claves, metas y actividades.

b) Dependiendo de que nivel del CMM se quiera evaluar se presentarán las correspondientes prácticas clave y actividades relacionadas.

c) El usuario introducirá la respuesta mediante front-end y el aplicativo otorgará la calificación correspondiente. Dicha calificación será a través de una búsqueda de concordancia entre una matriz conformada por las respuestas del usuario y las tablas referenciales que asignarán puntuaciones.

Por cada nivel KPA se tendrá como datos de salida las fortalezas y debilidades posibilitando la diagramación de los planes de mejora correspondiente.

La Tabla 2 brinda una descripción de alcance, funcionalidad y resultados obtenidos.

Los niveles, las áreas claves y las metas abarcadas en la norma simplificada son:
 Inicial: Compromiso del Equipo de Dirección con la Calidad

Repetible: Control Administrativo Básico

Optimizado: Control de los Procesos

Definido: Definición de Procesos

Administrado: Medición de los Procesos

La calificación del desempeño se indica en la Tabla 3.

Además de la calificación de desempeño es necesario agregar una calificación de importancia, que se establece según:

1 – NADA IMPORTANTE

2 – POCO IMPORTANTE

3 – MEDIANAMENTE IMPORTANTE

4 – MUY IMPORTANTE

5 – CLAVE PARA EL DESARROLLO DEL NEGOCIO

Valor	Enfoque	Utilización
Pobre (0)	<ul style="list-style-type: none"> No se reconoce su necesidad en el ámbito de la administración No existe habilidad por parte de la organización o el equipo No existe compromiso por parte de la organización o equipo La práctica no es evidente 	<ul style="list-style-type: none"> Ningún sector de la organización o el equipo utiliza la práctica Ningún sector de la organización o el equipo demuestra interés
Débil (2)	<ul style="list-style-type: none"> La administración comienza a reconocer la necesidad Se empiezan a crear procedimientos y procesos para apoyar las metas. 	<ul style="list-style-type: none"> Una pequeña parte de la organización o el equipo implementa la práctica Monitoreo limitado o verificación en uso
Justa (4) (Para metas que requieren un procedimiento documentado: Si no hay un procedimiento documentado, no se da una calificación mayor a 4)	<ul style="list-style-type: none"> Compromiso incompleto por parte de la administración Existe un camino definido para implementar la meta 	<ul style="list-style-type: none"> Cierta consistencia en el uso Se usa en la mayoría de la organización o el equipo Hay monitoreo o verificación de uso para una parte de la organización o el equipo (por al menos un mes)
Marginalmente Calificado (6) (Para metas que requieren un procedimiento documentado: El procedimiento esta documentado y se ha utilizado al menos una vez)	<ul style="list-style-type: none"> Gran compromiso por parte de la administración La implementación de la meta está en buen camino Existen ítems de apoyo 	<ul style="list-style-type: none"> Se utiliza en la mayoría de la organización o el equipo Monitoreo o verificación del uso de la mayoría de las partes de la mayoría de las partes de la organización o el equipo (por al menos 3 meses)

Valor	Enfoque	Utilización
<p>Calificado (8)</p> <p>(La organización cumple muy fuertemente lo plasmado en las guías. Dicho cumplimiento es asimilado fuertemente por cada una de las personas que componen la organización)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Compromiso total por parte de la administración • La administración es pro-activa 	<ul style="list-style-type: none"> • Se ocupa a lo largo de la organización o el equipo • Es consistente a lo largo de la organización
<p>Sobresaliente (9)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La práctica representa una parte integral del proceso • Ítems de apoyo alientan y facilitan el logro de la meta 	<ul style="list-style-type: none"> • Se monitorea o verifica a lo largo de la organización (al menos por 6 meses)
<p>Clase Mundial (10)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se comparte proactivamente el proceso afuera de la organización • Se reconoce la excelencia por externos a la organización 	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso de mejora continua mantenido (por al menos un año)
	<ul style="list-style-type: none"> • La administración provee con fervor liderazgo y compromiso. La excelencia de la organización es reconocida por externos 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso consistente y con penetración a lo largo de toda la organización o equipo • Se monitorea o verifica a lo largo de toda la organización

Tabla 3. Calificación de desempeño

Por cada área clave de cada nivel evaluado, se asigna un nivel de desempeño (0 a 10) y una importancia (1 a 5). La organización puede calificar (a través del desempeño) todas las áreas claves, asignándoles una importancia relativa. Pueden existir áreas más importantes con baja calificación (necesidad de un plan de acción inmediato) y otras menos importantes con alta calificación (tal vez no merezcan un plan de acción en el corto plazo).

Conclusiones

Un software de buena calidad debe principalmente satisfacer las expectativas de clientes y usuarios. Aun cuando la respuesta parece obvia, es en este punto donde fallan la mayoría de las empresas de nuestro país dedicadas a la elaboración de programas de software.

A pesar de que en los últimos años la industria informática nacional ha recibido muchos elogios, en especial al compararla con la del

resto de Latinoamérica, pareciera que todavía existe un bajo desempeño en el ámbito de los desarrolladores. En particular ésta es un área muy inmadura en sus procesos.

Existen dos variables que necesariamente deben considerarse al embarcarse en el desarrollo de un software: calidad y productividad. La primera depende de múltiples factores, como el personal a cargo del proceso, el tipo de herramientas usadas y la metodología aplicada. El segundo aspecto se refiere a la capacidad de la empresa de reducir costos previniendo las fallas antes de que se produzcan.

Este modelo es esencial en la detección del nivel de madurez alcanzado, y representa un camino evolutivo para pasar de un proceso inmaduro a uno disciplinado y controlado dentro de la compañía.

Esta conciencia de mejorar debería trasladarse también a los usuarios, quienes podrían ser

en el futuro un factor importante que impulse la demanda de las organizaciones dedicadas al desarrollo, por aprender las ventajas de éste u otros modelos que les permitan alcanzar un nivel de madurez adecuado.

De esta forma, quizás se podría alcanzar la difícil meta de tener un estándar de desarrollo que satisfaga tanto a los analistas de software como a los consumidores.

CMM no es una teoría, sino un nuevo enfoque y cuando se entiende se reconocen los beneficios, lo que hace que la organización mejore constantemente.

Acorde con toda la información recopilada, se puede concluir que en nuestro país existe preocupación por mejorar los procesos de desarrollo de software, pero todavía se está en el camino inicial para lograrlo.

Referencias

APPRAISAL WIZARD (2003) *Formal or informal appraisal tool*, Integrated System Diagnostics Incorporated. Demo disponible en el sitio de la empresa, <http://www.isd-inc.com>; página vigente en septiembre de 2008.

IME Toolkit (2003) *Interim Maturity Evaluation Toolkit*, Management Information Systems.

CMM (1993) Capability Maturity Model SM for Software, Version 1.1, Technical Report CMU/SEI-93-TR-024, ESC-TR-93-177, February 1993. Mark C. Paulk, Bill Curtis, Mary Beth Chrissis. Charles V. Weber.

CMM-Quest (2001) *Self assessment tool*, HM&S IT-Consulting GmbH. Demo disponible en el sitio de la empresa, <http://www.cmm-quest.com/>.

CMMI (2002) *Capability Maturity Model Integration*. Disponible en <http://www.sei.cmu.edu/cmmi/cmmi.html>, página vigente en septiembre de 2008.

SCAMPI (2001) *Standard CMMI Appraisal Method for Process Improvement*. <http://www.sei.cmu.edu/publications/documents/01.reports/01hb001.html>, página vigente en septiembre de 2008.

SEIR (2003) *Compiled list of Organizations who have Publicly Announced their Maturity Levels after having an Appraisal Performed*. Software Engineering Information Repository.

THE STANDISH GROUP (2003) Disponible en <http://www.standishgroup.com>, página vigente en septiembre de 2008.

Impregnación de durmientes de quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho blanco*) con preservadores cromocuproarsenicales (CCA)*

Damián Gherscovic¹⁻², Zulma Cataldi¹, Juan Miguel Languasco¹

¹ Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Buenos Aires
Departamento de Ingeniería Química y Dirección de Posgrado
Medrano 951 (C1179AAQ) – Buenos Aires Argentina

² Instituto Nacional de Tecnología Industrial - Madera y Muebles
Av. General Paz 157 (B1650WAB) – Buenos Aires Argentina

damianghe@hotmail.com

Recibido el 13 de noviembre de 2008; aceptado el 22 de diciembre de 2008

Resumen

La preservación de durmientes (usados como soportes ferroviarios) con compuestos hidrosolubles CCA es relativamente reciente en Argentina y el problema radica en que aún no ha sido optimizado el proceso de producción. En el presente trabajo se analiza la influencia de las variaciones de presiones de tratamiento en el método de impregnación, con el fin de lograr mejoras significativas en dicho proceso. Los resultados muestran que trabajando con una solución acuosa al 3,2 % m/v puede obtenerse una retención teórica de 10,8 kg/m³ de madera tratada, mediante la absorción de 338 litros de solución/m³ de madera trabajando a 1187 kPa. Asimismo puede obtenerse esa retención trabajando a un presión de 784 kPa, con una concentración de la solución de 4,1 % m/v.

PALABRAS CLAVE: PRESERVADORES HIDROSOLUBLES - COMPUESTOS CROMOCUPRO ARSENICALES - DURMIENTES - QUEBRACHO BLANCO

Abstract

Preservation applying waterborne CCA compounds to sleepers (to be used as railways tracks supports) is a recent application in Argentina and manufacturing processes are far from optimum. This work discusses the influence of pressure on treatment in order to reach significant improvements on the impregnation process. Results show that using an aqueous solution 3,2% w/v concentration, a theoretical retention of 10,8 kg/m³ of treated wood is achieved, by means of a 338 liters solution absorption when a 1187 kPa treatment pressure is applied. Also this retention could be achieved by applying a 784 kPa pressure and a solution concentration of 4,1 % w/v.

KEYWORDS: WATERBORNE PRESERVATIVES – CHROMECOPPERARSENICAL COMPOUNDS – SLEEPERS - QUEBRACHO BLANCO

* Trabajo realizado sobre la base de la tesis presentada por D. Gherscovic para optar al grado de Licenciado en Ciencias Aplicadas, bajo la dirección de J. M. Languasco.

INTRODUCCIÓN

Entre los problemas de infraestructura encontrados en los ferrocarriles argentinos se encuentra el del reemplazo de los durmientes de madera. La madera de quebracho colorado, una de las preferidas para este uso, empieza a escasear, presenta un costo elevado y tiende a ser reemplazada por el quebracho blanco impregnado con un preservador de tipo cromocuproarsenical (CCA).

Características de los durmientes

En Argentina los durmientes de aparatos de vía tienen longitudes que varían entre 1,80 y 5,00 m, con altura de 0,12 m y un ancho de 0,24 m. (Norma IRAM-FA L 9556-1970). La diferencia de longitudes obedece al tipo de trocha (angosta, estándar y ancha) y de su uso (según sean comunes, para cambio y cruzamiento y para puentes).

Sin embargo los más habituales tienen una longitud de 2 m (trocha angosta), 2,50 m (trocha estándar) y 2,70 m (caso trocha ancha).

Protección de la madera para durmientes

Un estudio realizado para la Rede Ferroviaria Federal S/A, Brasil (RFFSA) en 1960 mostró que el tratamiento sistemático de los durmientes alargaba la vida útil de los mismos, cuya duración media se indica en la Tabla 1 (Pereira da Silva, R, L. 1986):

País	Duración media (años)
Japón	11,5
México	16,0
España	17,5
Inglaterra	34,0
Estados Unidos	35,0

Tabla 1. Duración media de durmientes para distintos países

Maderas usadas en la fabricación de durmientes

Entre las especies de madera utilizadas internacionalmente para los durmientes se encuentran quebracho colorado, quebracho blanco, roble, haya, pino Oregón, abeto, pino rojo del Báltico, cedro, abedul y eucalipto (UNLP, 2006).

En la Argentina se han usado históricamente urunday, guayacán, quebracho colorado, eucalipto colorado y quebracho blanco tratado con creosota. En la actualidad se utilizan masivamente los tres nombrados en último término.

Características del quebracho blanco.

El término "quebracho" se aplica corrientemente a especies forestales pertenecientes a los géneros botánicos Schinopsis y Aspidosperma. La especie del género Aspidosperma recibe el nombre vulgar de "quebracho blanco", en razón de su color blanco amarillento (Tinto, 1988).

El quebracho blanco, cuyo nombre científico es Aspidosperma quebracho-blanco Schlecht, es un árbol cuya altura varía entre 10 y 20 m, alcanzando hasta 1 m de diámetro (García, 1960), posee una albura color blanco amarillenta y un duramen color amarillo ocráceo a amarillo rosado (Guindeo Casusus, 1997).

La densidad de la madera seca al aire a 15% de humedad relativa, es aproximadamente de 800 kg/m³ (Guindeo Casusus, 1997)

Es una madera, en relación con su densidad, medianamente resistente a los esfuerzos de flexión y compresión paralela y corte, con buena resistencia a la compresión perpendicular y dura (Tortorelli, 1956).

Sin embargo, el quebracho blanco pocas veces muestra su leño de color uniforme, porque presenta generalmente un falso corazón de color rosa fuerte a castaño rojizo que es producto de la acción de un hongo (Iaconis, 1957). Esta enfermedad no afecta las propiedades físico-mecánicas de la madera (Lizarraga, 1972).

El hongo causante de la mancha roja es el *Fusarium scirpii*. El ataque se produce en el árbol en pie, siendo mayor en la parte inferior del tronco y disminuye con la altura. Las manchas rojas características presentan contornos irregulares y se extienden desde la médula al exterior. La coloración es mas intensa en la zona central. Hay individuos con oquedades por degradación en la médula de la sección. Microscópicamente puede observarse que las hifas del hongo penetran por las puntuaciones de los vasos produciendo una obstrucción parcial o total del vaso (Moglia, 2004) tal como se indica en la Fig. 1.

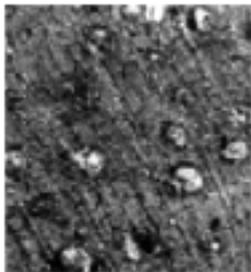


Fig. 1. Obstrucción de los vasos producida por las hifas del hongo (Moglia, 2004).

Durabilidad natural de la madera

Según la Norma IRAM 9600-1998 el quebracho blanco entra en la clase 3¹, maderas poco durables (vida útil estimada entre 5 y 10 años).

Dado que el quebracho blanco es considerado una especie poco durable, deberá ser tratada químicamente para aumentar su durabilidad natural.

Concepto de penetración

La penetración es la profundidad que alcanza el preservante en la madera tratada; depende de la permeabilidad y humedad de la madera, de la clase de preservador utilizado y del tipo de tratamiento aplicado.

Clasificación de las maderas por el grado de penetrabilidad del duramen

Según la Norma IRAM 9600-1998, las maderas pueden clasificarse en cuatro categorías:

- Clase I. Penetrables
- Clase II. Moderadamente penetrables
- Clase III. Poco penetrables
- Clase IV. Difícilmente penetrables

El quebracho blanco entra en la clase I², penetrables, respecto a la penetración del duramen.

Los preservadores de la madera y el medio ambiente

El CCA, el pentaclorofenol y la creosota, entre otros, han sido cuestionados ambientalmente y

ha sido prohibido total o parcialmente su uso como preservadores en algunos países.

En Argentina aún no existe legislación al respecto para el CCA y la creosota, aunque en el caso del pentaclorofenol, éste se encuentra totalmente prohibido (Resolución³ 356/94 del Ministerio de Salud Pública). (Ministerio de Salud, 2008).

Metodología

El objetivo de este trabajo es evaluar la penetración, la absorción y la retención de un preservante hidrosoluble de tipo CCA con relación a las presiones aplicadas en el tratamiento de impregnación. El mismo se aplica a muestras de madera de quebracho blanco con un espesor y ancho idéntico a las dimensiones fabricadas con esta especie, aunque de longitud significativamente menor. En las probetas fueron evaluadas la humedad y la densidad aparente antes del tratamiento de preservación y la penetración, la absorción y la retención del preservante en la madera luego del proceso de impregnación.

La impregnación se realizó con el método Bethell (vacío-presión-vacío) y utilizando CCA con una concentración cercana al 2% m/m. Se impregnó un grupo de probetas a una presión de 1187 kPa y también (otro grupo) a 784 kPa. Se realizó una serie impregnando durante un periodo de 1h y otra impregnando a rechazo.

Preparación de probetas para ensayo

Para la realización de los ensayos se recibieron 12 trozos de madera de quebracho blanco pertenecientes a secciones de durmientes, con dimensiones aproximadas de 120 x 240 x 800 mm (espesor, ancho y largo). Seis de estas maderas provenían de Santiago de Estero y las otras seis del Chaco, que son provincias de la República Argentina donde se encuentra la mayor producción de madera de esta especie.

El material fue procesado con el fin de obtener las probetas que se usaron en el presente trabajo. La primera elaboración concluyó en el corte

1 Clasificación que considera solamente el duramen, expuesto al ataque de hongos xilófagos frente al mayor riesgo de uso, entendiéndose por tal el empleo de la madera sin preservación en contacto con el suelo o agua dulce. Cada exposición ofrece un riesgo diferente y éste condiciona la vida útil de la madera. Los rangos de durabilidad corresponden a datos aproximados, algunos a los ensayos experimentales, otros de la observación de comportamientos. Deben por lo tanto aceptarse como estimativos.

2 Clase I: Penetrables (Clasificación de las maderas por el grado de penetrabilidad del duramen. Implica la accesibilidad de soluciones en cuanto a su alcance y profundidad).

3 La resolución 356 del año 1994 prohíbe la producción, la importación, el fraccionamiento, el almacenamiento y la comercialización del pentaclorofenol y sus derivados.

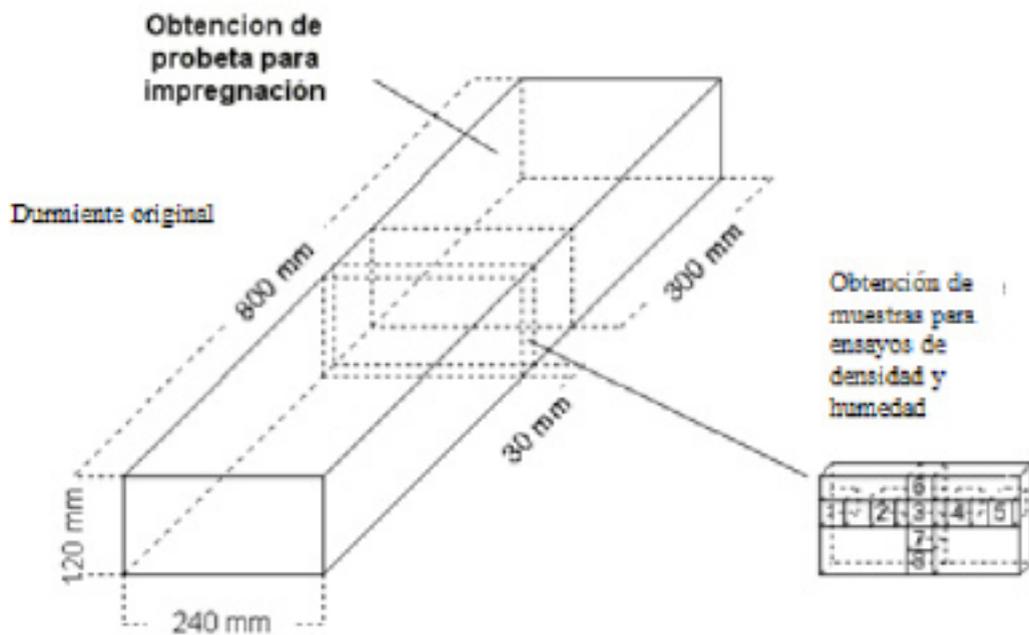


Figura 2. Diagrama con las zonas de extracción de las probetas y las muestras para la realización de ensayos

e identificación de los 12 trozos mencionados, cortando de cada uno de ellas una probeta de 120 x 240 x 300 mm, para su utilización en los ensayos de impregnación, y una muestra, tomada de la zona central de cada sección de durmiente de 120 x 240 x 30 mm, que se utilizó para realizar los ensayos de humedad y densidad.

A su vez las muestras obtenidas para los ensayos de humedad y densidad, con el fin de hacer el resultado más representativo, fueron cortadas en 8 cubos de aproximadamente 30 x 30 x 30 mm de las zonas señaladas según Figura 2; éstos se identificaron y se reservaron en bolsas plásticas impermeables para la posterior realización de los ensayos.

Determinación de humedad

Equipamiento utilizado para la determinación de humedad y densidad

- Estufa con termostato. Marca Dalman. Temperatura máxima 250 ±2 °C
- Balanza electrónica analítica. Marca Sartorius, Modelo 420S, Capacidad máxima 420g, mínima división 1 mg.
- Desecador de vidrio con silicagel.
- Calibre. Marca Somet. Mínima división: 0,1mm

Procedimiento

Las muestras se dejaron 24 h en estufa; se retiraron, se enfriaron en desecador y se pesaron.

Esta operación se repitió hasta constatar una diferencia de peso entre lecturas menor que 0,01 g (Norma IRAM 9532-1963).

El contenido de humedad se calculó mediante la ecuación siguiente:

$$H = ((M_i - M_f) \times 100) / M_f \quad \text{donde:}$$

H: Contenido de humedad sobre base seca, en %

M_i: Masa de la muestra original, en g

M_f: Masa de la muestra seca, en g

Determinación de la densidad

En el presente trabajo los valores expresados de la densidad, corresponden a la densidad aparente, es decir a la masa de la unidad de volumen de la madera seca hasta peso constante, denominada densidad anhidra.

Procedimiento

Sobre las muestras utilizadas para la determinación de humedad, se obtuvo la densidad anhidra de las mismas. Para ello se determinó el volumen de las muestras mediante un calibre, midiendo alto, ancho y espesor de la probeta.

La densidad se calculó mediante la ecuación siguiente:

$$\rho_w = (M_f / W) \times 1000 \quad \text{donde:}$$

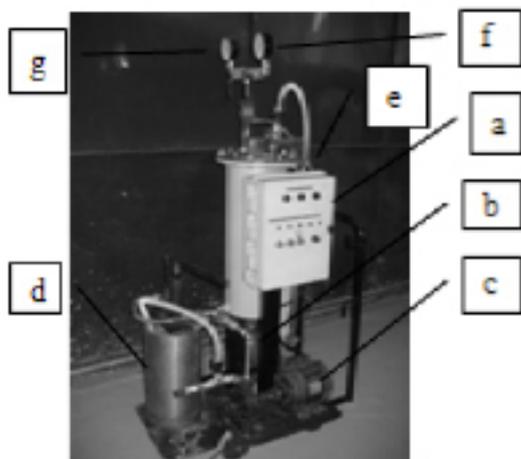


Fig. 3. Autoclave piloto.

- a) Tablero de control
- b) Bomba de vacío
- c) Bomba de presión del tipo centrífuga
- d) Bomba de presión manual
- e) Pulmón de vacío
- f) Manómetro
- g) Vacuómetro

p_w : Densidad de la madera, en kg/m^3
 M_f : Masa de madera seca, en g
 W : Volumen de madera, en cm^3

Impregnación de muestras

Preparación de las muestras

Las muestras debieron ser cortadas en aproximadamente 2 cm en su ancho, para poder ser ingresadas en el autoclave piloto. Las mismas fueron medidas y pesadas previo a su ingreso en el autoclave.

Preparación de la solución

Se preparó una solución a partir de CCA tipo C comercial, marca TannerWood® (producto concentrado al 60% m/m sobre base de óxidos) y agua de red, alcanzándose una concentración de 2,2 % m/m en base óxidos.

Equipamiento

- Autoclave piloto, con las siguientes características: Cuerpo cilíndrico de acero, vertical, con cierre hermético, apto para presiones menores a los 1576 kPa (16 kgf/cm^2), con apertura superior, mediante tapa anclada sobre junta de goma y cerrada mediante tornillos, con un diámetro útil de 30 cm y una altura útil de 60 cm. (Fig. 3)

- pHmetro. Marca Luton, modelo: PH 207.
- Balanza electrónica. Capacidad máxima 100 kg, mínima división 10 g.
- Sierra circular de mano. Marca Skil. Potencia 1300 W.

Proceso de impregnación

A- Presión de trabajo 784 kPa (8 kgf/cm^2)

Las secciones de durmientes, una vez pesadas y medidas, se ingresaron al autoclave, de a dos probetas por proceso, cuidando que una de las muestras fuera perteneciente a Chaco y la otra a Santiago del Estero; se cerró herméticamente y según el proceso Bethell se sometieron a un vacío absoluto de 600 mm Hg por un periodo de 30 minutos.

Luego de finalizar este periodo, sin detener el vacío, se permitió el ingreso de la solución preservadora al autoclave, hasta llenarlo completamente.

Una vez completado el proceso de llenado se sometió a la solución en la que se encontraba sumergida la madera a una presión de 784 kPa (8 kgf/cm^2) por un lapso de 1 hora, con la utilización de la bomba manual.

Concluido dicho periodo se procedió al vaciado de la solución preservadora del autoclave y se comenzó a aplicar un vacío de 600 mm Hg durante 5 minutos. A continuación se detuvo la bomba de vacío y se permitió el ingreso de aire al autoclave. Se abrió el autoclave, se dejaron orear las maderas y se pesaron nuevamente en la balanza electrónica las dos probetas impregnadas.

De la solución preservadora utilizada al final de cada proceso se tomó una muestra para su posterior análisis de concentración del preservante y de pH.

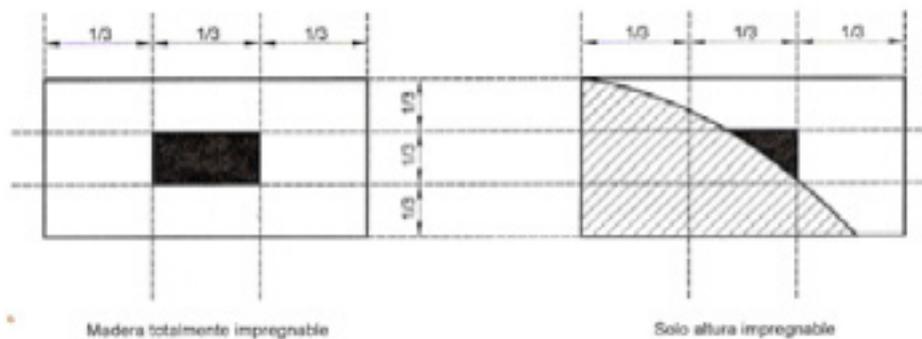


Fig. 4. Diagrama de zona de toma de muestra según Norma IRAM 9600-98.

B- Presión de trabajo 1187 kPa (12 kgf/cm²).

Se procedió de igual manera que en el ciclo anterior, pero utilizando una presión de 1187 kPa.

Proceso de reimpregnación

En los procesos anteriormente realizados, tanto para las impregnaciones con 784 kPa como con 1187 kPa de presión, se observó que al realizar el cierre del ciclo con un tiempo de 1 h, no se conseguía que la presión se mantuviera estable y descendía al suprimir el bombeo, lo que implicaba que podía seguir ingresando la solución preservadora. Por tal razón se decidió realizar una nueva impregnación hasta estabilizar la presión, lo que implicaba realizar una impregnación a rechazo, proceso que demandó entre 90 y 120 minutos para las distintas impregnaciones realizadas.

El impregnar de esta forma lleva a realizar el periodo de presión no por un tiempo fijo determinado, sino hasta que no se produzca más ingreso de solución a la madera.

A cada una de las probetas, una vez realizada la primera impregnación, se les cortó una sección de aproximadamente 2 cm con el uso de una sierra circular de mano. Debido a que a algunas de las muestras se les había realizado además otro corte para el análisis de retención y penetración, se repitió la experiencia pero con 8 probetas, 4 para la experiencia con una presión de 784 kPa y 4 para el proceso con 1187 kPa de presión.

Extracción de muestras para la realización de los análisis de retención y penetración

Sobre las probetas impregnadas se realizaron 4 cortes, para determinar la retención y pene-

tración en distintas zonas del durmiente, como se muestra en la Fig. 5.

Ensayo de la penetración del preservante en la madera

Reactivos

-Solución de Cromoazuro S, según Norma IRAM 9508

Procedimiento

Sobre las caras seleccionadas se roció con una solución de cromoazuro S, para la determinación del cobre presente en la madera. La muestra se pulverizó con la solución, reconociéndose la presencia de cobre por la tonalidad azul. Este método detecta cobre en concentraciones superiores a 25 ppm (AWPA A3-2005).

Ensayo de la retención del preservante en la madera

Equipamiento

- Molino eléctrico. Marca Braun. Potencia 150 W.
- Prensa con torquímetro . Marca Panapress. Capacidad 0- 700 kgf.cm.
- Mechas para madera de 5 mm de diámetro.
- Estufa con termorregulador. Marca Dalman. Temperatura máxima 250 ±2°C
- Balanza electrónica. Capacidad máxima 100 kg, mínima división 10 g.
- Desecador de vidrio con silicagel.
- Espectrómetro de fluorescencia de rayos X. Marca Spectro. Modelo Phoenix

Para su funcionamiento, el equipo necesita una calibración previa con muestras que contienen los elementos de interés en una matriz determinada En este caso se utilizaron

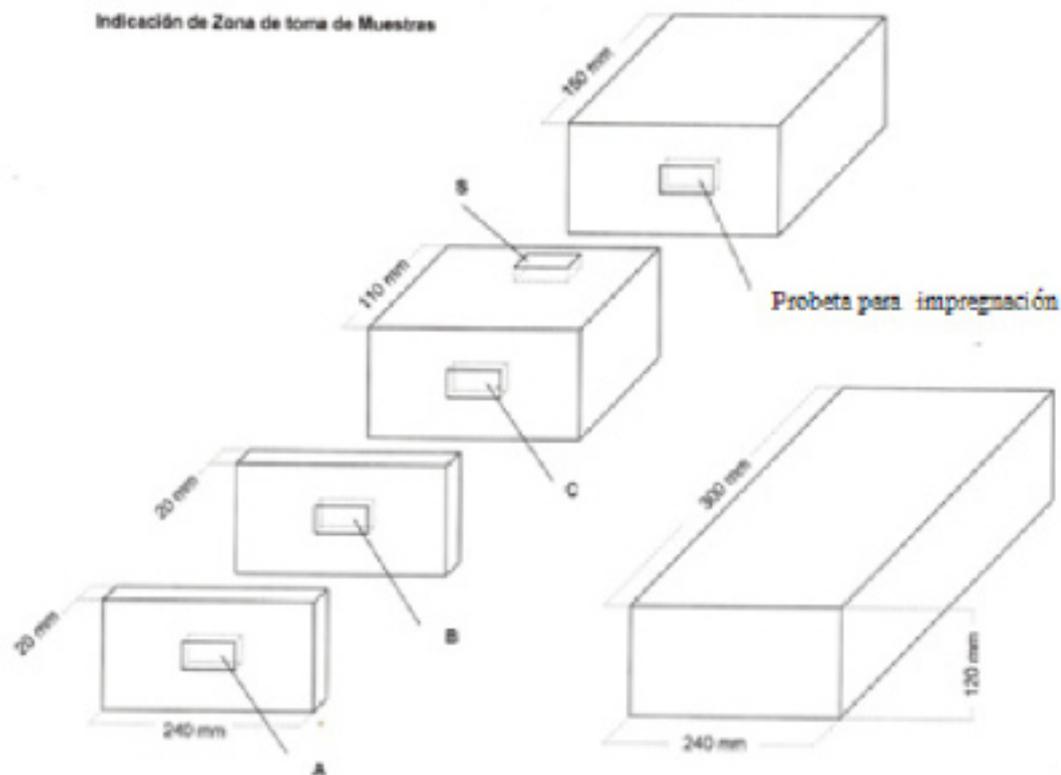


Fig. 18. Diseño Mecánico. a) aspecto exterior; b) sin cubierta.

patrones de madera impregnada con CCA, provistos por la AWWPA (American Wood Preservers' Association)⁴

Procedimiento

Las zonas de toma de muestra se seleccionaron de las áreas indicadas en la Figura 5, de acuerdo con la Norma IRAM 9600-1998. La citada Norma exige que en maderas aserradas cuyo duramen se clasifique como penetrable, se tome como muestra una sección central en el punto medio de la pieza (Figura 4). Esta zona corresponde con la denominada como D, en la Figura 5. La zona D es la más desfavorable para el ingreso del preservador.

Para la extracción de aserrines se utilizó una mecha para madera de 5 mm de diámetro y mediante el uso de un taladro eléctrico se realizaron agujeros de 2 cm de profundidad aproximadamente, de donde se obtuvieron las virutas. Las mismas fueron sometidas a un proceso de molienda para generar un aserrín fino que pudiera ser utilizado para armar pastillas homogéneas que son luego analizadas con el espectrómetro de fluorescencia de rayos X, (Norma

IRAM 9597-1991).

Los aserrines fueron secados en estufa eléctrica por un periodo de 24 h a $103 \pm 2^\circ\text{C}$.

Con las muestras secas se prepararon las pastillas de análisis, con el prensado del aserrín a 288 kgf.cm, en las cápsulas plásticas utilizadas por el equipo.

Se colocaron las cápsulas en el interior del espectrofotómetro, se ingresó la densidad aparente de la muestra y se irradiaron las muestras con un tiempo de análisis de 100 segundos.

Ensayo de las soluciones de CCA utilizadas en los distintos procesos de impregnación

Los análisis de concentración de la solución se realizaron utilizando el espectrómetro de rayos X. Este equipo viene de fábrica precalibrado para el análisis de soluciones preservadoras CCA. El tiempo de análisis fue de 100 segundos.

Además a cada una de las muestras analizadas se les determinó el pH, mediante el uso de un phmetro digital.

⁴ La AWWPA es una organización no lucrativa que es responsable de promulgar estándares de madera voluntarios para la preservación de la madera

Origen	Nº Probeta	% Humedad		
Chaco	1	18,1	Promedio	Desvío
	4	17,8		
	5	17,6		
	7	20,0	20,0	
	8	22,0		
	9	24,5		
S. del Estero	2	29,6	Promedio	Desvío
	3	21,6		
	6	19,4		
	10	21,8	23,8	
	11	29,9		
	12	20,6		

Fig. 4. Diagrama de zona de toma de muestra según Norma IRAM 9600-98.

Absorción de preservante en la madera

Es la cantidad total de la solución del preservante (expresada en litros) que queda en un determinado volumen de madera (m³) después de la impregnación. En el presente trabajo la absorción se determinó a partir de la masa de la madera antes y después de la impregnación y la medición del volumen de madera a impregnar. Al obtenerse una diferencia de masa (kg), ésta se convirtió en volumen utilizando la densidad de la solución preservadora.

$$A = (M_2 - M_1) / W \quad V = A / \rho_s \quad \text{donde:}$$

A: Absorción, expresada en kg de solución preservadora /m³ de madera tratada.

V: Absorción, expresada en litros de solución preservadora /m³ de madera tratada.

M₂: Masa de la madera después del tratamiento, en kg.

M₁: Masa de la madera antes del tratamiento, en kg.

W: Volumen de la madera, en m³.

ρ_s : Densidad de la solución preservadora, en kg/m³ de solución.

Retenciones calculadas a partir de la absorción

Con la utilización de los datos registrados de las masas iniciales y finales de las muestras antes y después de la impregnación y conociendo las concentraciones de las soluciones del preservador utilizadas, se realizó el cálculo de

las retenciones teóricas obtenidas según la siguiente fórmula:

$$R \text{ teórica} = ((M_2 - M_1) \times C_s) / W = ((M_2 - M_1) \times (B / \rho_s)) / W \quad \text{dado que } C_s = B / \rho_s; \text{ donde:}$$

R_{teórica}: Retención teórica de la madera, en kg de óxidos/m³ de madera tratada

M₂: Masa final de la probeta, en kg

M₁: Masa inicial de la probeta, en kg

C_s: Concentración de la solución preservante, en % m/m

B: Concentración de activos en la solución final, en % (m/v)

ρ_s : Densidad de la solución preservadora, en kg/m³ de solución.

W: Volumen de la madera, en m³

Resultados

Humedad

En la Tabla 2 se expresan las humedades promedio de cada probeta, separada según origen. Además se informa la humedad promedio⁵ y desvío⁶ por origen.

En las Figuras 6 y 7 se representan las humedades promedio encontradas para cada probeta y sus desvíos, comprendidos entre 1 y 2 sigmas⁷, correspondientes a las desviaciones típicas de la media, con un nivel de confianza del 68 y 95 % para una distribución normal, respectivamente.

⁵ En el presente trabajo el término promedio refiere al promedio aritmético.

⁶ En el presente trabajo el término desvío refiere al desvío estándar.

⁷ Se denota con Sigma al valor del desvío estándar en una distribución normal

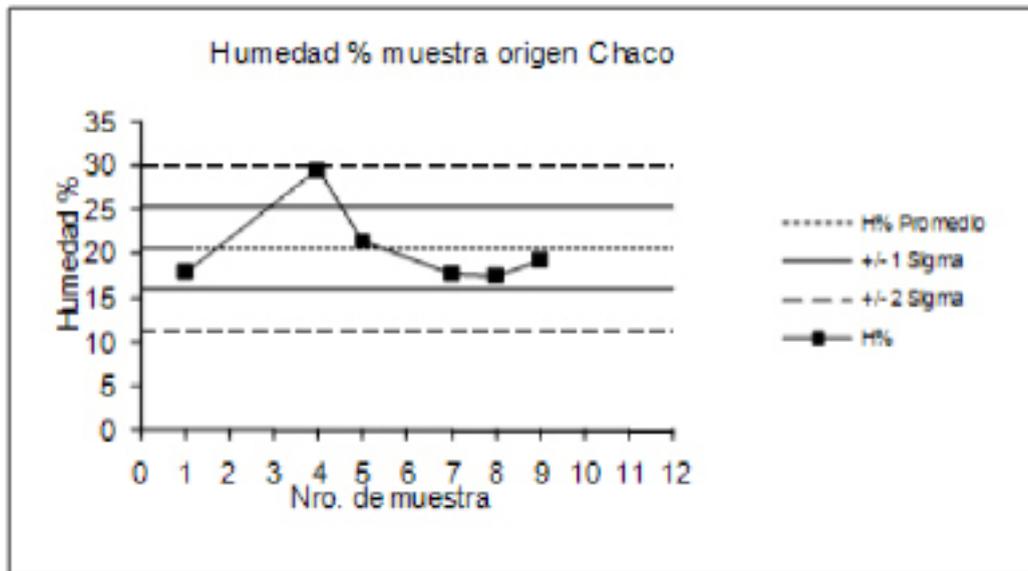


Fig. 6. Humedad de las muestras de la provincia de Chaco.

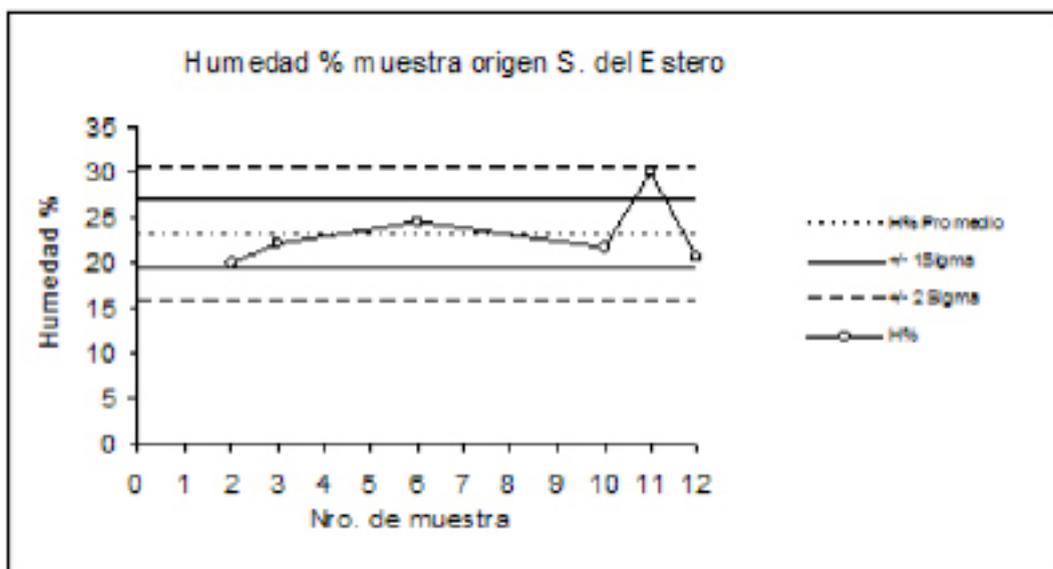


Fig. 7. Humedad de las muestras de la provincia de Santiago del Estero

De los resultados obtenidos puede concluirse que la humedad es similar para ambos orígenes de la madera, considerando los valores promedios y su dispersión. Nótese que se desconocen los periodos y condiciones de secado de los durmientes ensayados.

Densidad

En la Tabla 3 se expresan las densidades promedio de cada probeta, separada según origen. Además se informa la densidad promedio y el desvío por origen.

De los resultados obtenidos, puede concluirse que la densidad es similar para ambos orígenes de la madera, considerando los valores promedios y su dispersión.

Si se relaciona la absorción con la densidad de la madera obtenemos que:

1) La densidad de la madera influye en forma no muy significativa sobre el volumen de solución preservadora absorbida. Muestra una ligera tendencia a disminuir al aumentar aquella.

2) La presión de trabajo influye notablemente sobre el volumen de solución absorbido, como puede verse en Figuras 8 y 9, independientemente de la procedencia de la madera.

Retención teórica

Se presentan en la Tabla 4 los resultados de las retenciones obtenidas a partir de la absorción.

Origen	Nº Probeta	Densidad		Promedio	Desvío
		kg/cm ³	g/cm ³		
Chaco	1	869	0,869	829	30
	4	823	0,823		
	5	842	0,842		
	7	804	0,804		
	8	846	0,846		
	9	787	0,787		
S. del Estero	2	821	0,821	874	65
	3	793	0,793		
	6	939	0,939		
	10	935	0,935		
	11	832	0,832		
	12	921	0,921		

Tabla 3. Densidad de las muestras según origen

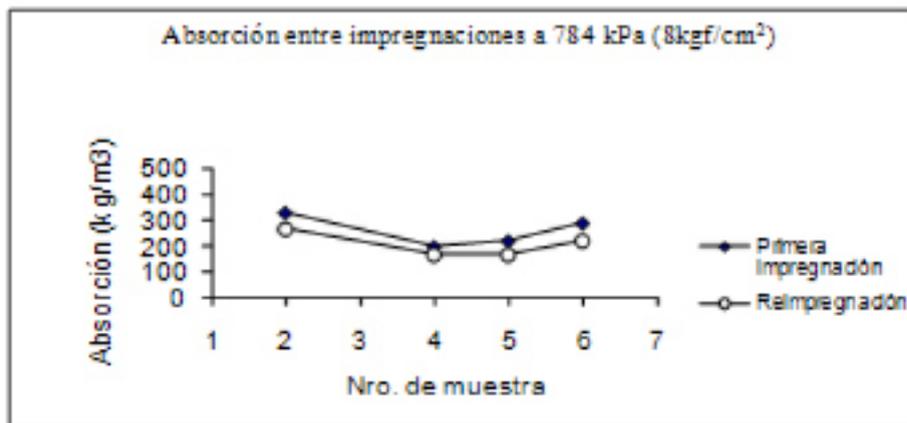


Fig. 8. Absorción de las probetas de maderas tratadas a una presión de 784 kPa

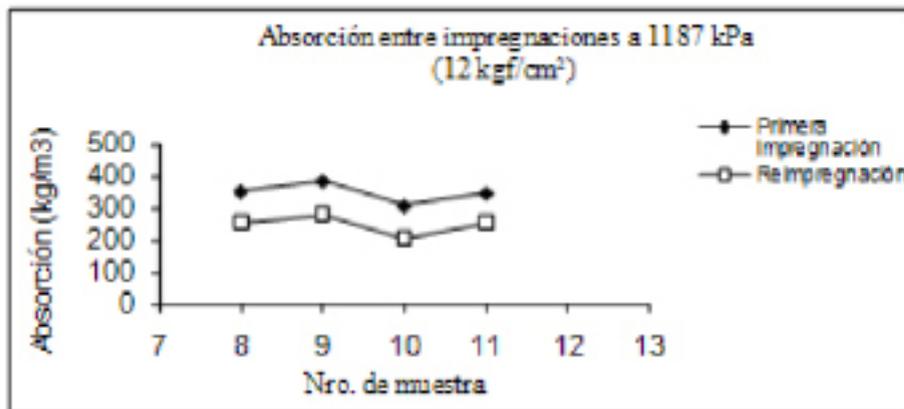


Fig. 9. Absorción de las probetas de madera tratada a una presión de 1187 kPa

Presión de Trabajo (kPa)	Muestra	Retención ¹ (kg/m ³)	Retención ² (kg/m ³)
784	1	4,4	---
	2	7,5	13,2
	3	6,7	---
	4	3,9	7,5
	5	4,4	7,9
	6	6,6	11,3
1187	7	8,9	---
	8	8,3	13,8
	9	7,6	13,3
	10	7,2	11,6
	11	8,2	13,3
	12	6,4	---

Tabla 4. Retenciones teóricas.

1 Retención correspondiente a la primera impregnación.

2 Retención final en la madera luego de la reimpregnación a rechazo.

Retención

En las siguientes tablas se informa los valores de retención obtenidos a partir de los resultados de los análisis químicos de las distintas probetas, obteniendo la muestra de la zona denominada como D (ver Fig. 5).

La zona de toma de muestra es la señalada en la Norma IRAM 9600. Los valores de retención de las probetas 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10 y 11, corresponden a la reimpregnación a rechazo de probetas, impregnadas a las presiones de 784 y 1187 kPa .

Muestra		CrO ₃	CuO	As ₂ O ₅	Retención Total (kg/m ³ de madera)
1	Concentración (% m/m)	0,0636	0,0322	0,0993	1,7
	Retención (kg/m ³). R _i	0,55	0,28	0,86	
	Balance (%)	40,1	20,4	39,5	
3	Concentración (% m/m)	0,2163	0,1143	0,2263	4,4
	Retención (kg/m ³). R _i	1,72	0,91	1,79	
	Balance (%)	40,1	20,4	39,5	

Tabla 5. Retención en la madera en la zona D, para las probetas 1 y 3, en la primera impregnación, a 784 kPa

Muestra		CrO ₃	CuO	As ₂ O ₅	Retención Total (kg/m ³ de madera)
7	Concentración (% m/m)	0,3829	0,2015	0,3105	7,2
	Retención (kg/m ³). R _i	3,08	1,62	2,50	
	Balance (%)	40,1	20,4	39,5	
12	Concentración (% m/m)	0,2260	0,1151	0,2227	5,2
	Retención (kg/m ³). R _i	2,08	1,06	2,05	
	Balance (%)	40,1	20,4	39,5	

Tabla 6. Retención en la madera en la zona D, para las probetas 7 y 12, en la primera impregnación, a 1187 kPa

Muestra		CrO ₃	CuO	As ₂ O ₅	Retención Total (kg/m ³ de madera)
2	Concentración (% m/m)	0,4371	0,1696	0,3333	7,7
	Retención (kg/m ³). R _i	0,52	0,26	0,82	
	Balance (%)	40,1	20,4	39,5	
4	Concentración (% m/m)	0,1208	0,0229	0,1286	2,2
	Retención (kg/m ³). R _i	0,99	0,19	1,06	
	Balance (%)	40,1	20,4	39,5	
5	Concentración (% m/m)	0,083	0,0234	0,1035	1,8
	Retención (kg/m ³). R _i	0,70	0,20	0,87	
	Balance (%)	40,1	20,4	39,5	
6	Concentración (% m/m)	0,2732	0,1212	0,2307	5,9
	Retención (kg/m ³). R _i	2,57	1,14	2,17	
	Balance (%)	40,1	20,4	39,5	

Tabla 7. Retención en la madera en la zona D, para las probetas 2, 4, 5 y 6, impregnadas a rechazo a 784 kPa.

Muestra		CrO ₃	CuO	As ₂ O ₅	Retención Total (kg/m ³ de madera)
8	Concentración (% m/m)	0,4648	0,2193	0,3384	8,7
	Retención (kg/m ³). R _i	3,91	1,80	2,78	
	Balance (%)	40,1	20,4	39,5	
9	Concentración (% m/m)	0,4621	0,2129	0,3288	7,9
	Retención (kg/m ³). R _i	3,64	1,68	2,59	
	Balance (%)	40,1	20,4	39,5	
10	Concentración (% m/m)	0,3046	0,1469	0,2619	6,7
	Retención (kg/m ³). R _i	2,85	1,37	2,45	
	Balance (%)	40,1	20,4	39,5	
11	Concentración (% m/m)	0,4436	0,1719	0,3203	7,8
	Retención (kg/m ³). R _i	3,69	1,43	2,66	
	Balance (%)	40,1	20,4	39,5	

Tabla 8. Retención en la madera en la zona D, para las probetas 8, 9, 10 y 11, impregnadas a rechazo a 1187 kPa.

En la Figura 10 se observa que las retenciones de las probetas impregnadas a una presión de trabajo de 1187 kPa, son claramente superiores a las impregnadas con 784 kPa.

A continuación se realizó una comparación entre las probetas con origen Chaco y las provenientes de Santiago del Estero, para las retenciones

obtenidas, impregnando con una presión de 784 y 1187 kPa, en las distintas zonas de toma de muestra. Puede observarse que ambos orígenes presentan un comportamiento similar, con una disminución de la retención a medida que se toma la muestra de la zona más alejada a los extremos, y de más difícil ingreso del preservador como se ve en las Figuras 11 y 12.

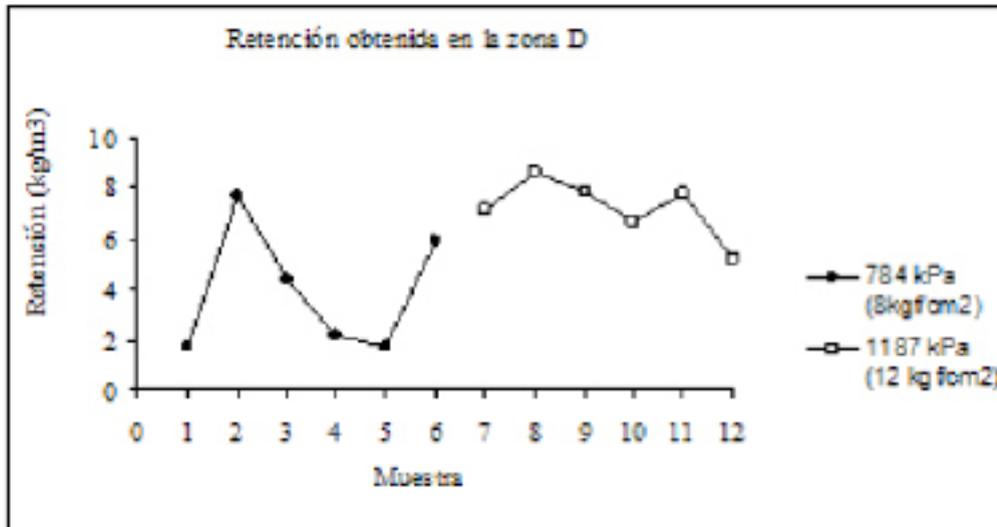


Fig. 10. Valores de retención obtenidos para las distintas probetas, tomada en la zona D

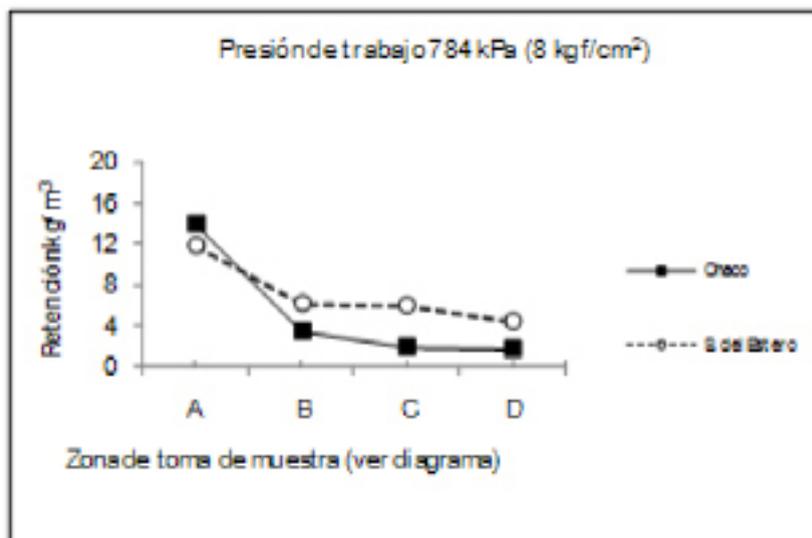


Fig. 11. Retención obtenida para las distintas zonas de toma de muestra, presión de 784 kPa

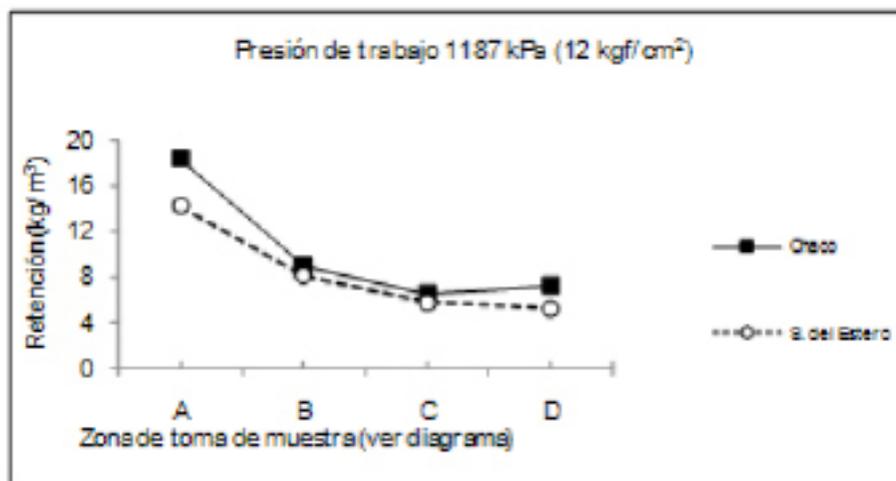


Fig. 12. Retención obtenida para las distintas zonas de toma de muestra, presión de 1187 kPa

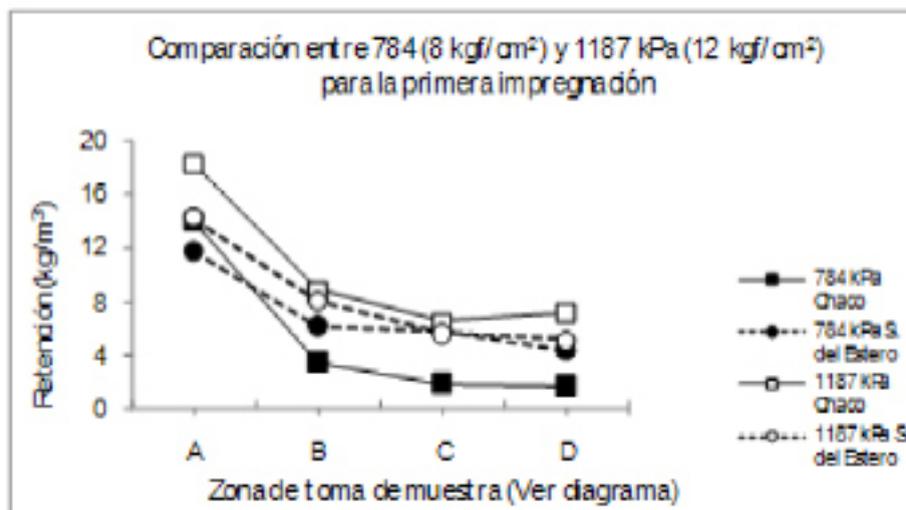


Fig. 13. Comparación de las retenciones obtenidas para las distintas zonas de toma de muestra a una presión de 784 kPa y 1187 kPa..

En el caso de las probetas sometidas a una sola impregnación podemos observar su comportamiento en la Figura 13.

De la figura 13 se pueden obtener dos conclusiones:

- 1) La procedencia de la madera no influye significativamente sobre la retención lograda. Ver los Gráf. 6 y 7, impregnados a una misma presión.
- 2) La presión de trabajo influye de manera considerable sobre la retención como puede apreciarse en el Gráf. 8, aún en maderas de diferente procedencia.

Penetración

Los cortes transversales de las probetas tratadas con el reactivo Cromoazurol S muestran una coloración azul en las zonas que fueron penetradas por el preservador. En la media de las probetas puede decirse que la penetración es total e irregular.

En probetas como la 11-3⁸, se observa una penetración que varía significativamente según los anillos de crecimiento (Figura 14)

En el caso de la probeta 9-3⁹ se observa que la penetración en la zona medular es muy baja o nula, diferenciando una zona de color rojizo posiblemente atribuible a la presencia de la mancha roja (Figura 15)

Respecto a la influencia de la presión aplicada al tratamiento puede observarse que el incremento de la misma, aumenta la penetración (o mejora la distribución) del preservador en la madera como puede verse en la Figura 16, correspondiente a la aplicación de una presión de 784 kPa y la Figura 17, perteneciente a una probeta tratada con una presión de 1187 kPa, donde claramente se observa la mejora en la penetración.

La zona D es la más desfavorable para el ingreso del preservador. En las Figuras 18 y 19, puede verificarse que la muestra 10.2, que

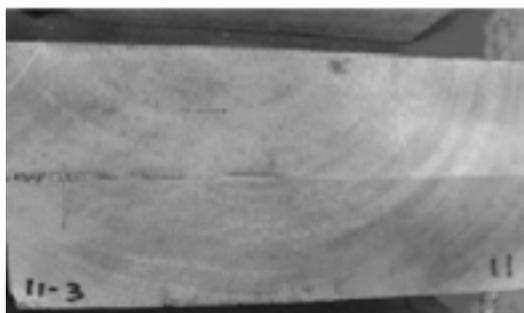


Figura 14. Muestra 11-3 pulverizada con Cromoazurol-S

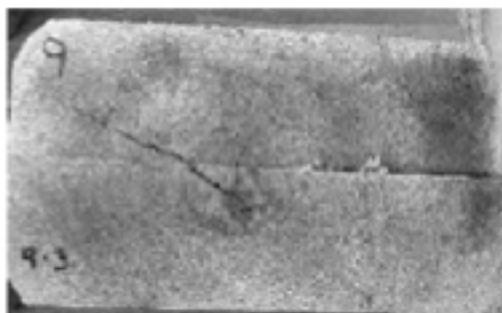


Fig. 15. Muestra 9-3 pulverizada con Cromoazurol-S

8 La identificación 11-3 corresponde a la probeta nro. 11, zona D como muestra la Figura 4

9 La identificación 9-3 corresponde a la probeta nro. 9, zona D como muestra la Figura 4

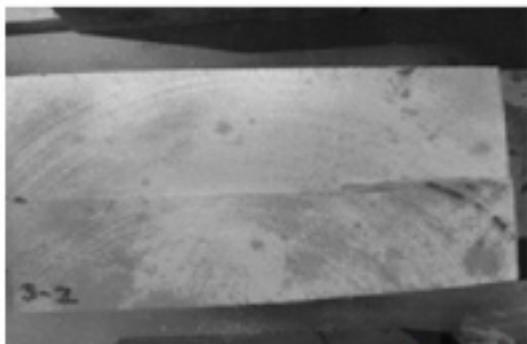


Fig. 16. Muestra 3-2 pulverizada con Cromoazurol-S

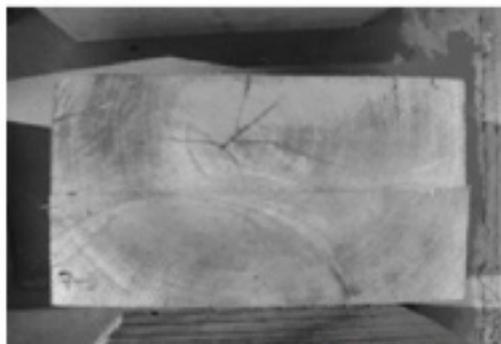


Fig. 17. Muestra 7-3 pulverizada con Cromoazurol-S

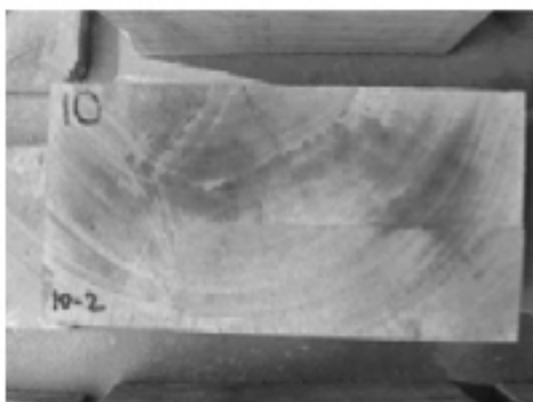


Fig. 18. Muestra 10-2 pulverizada con Cromoazurol-S

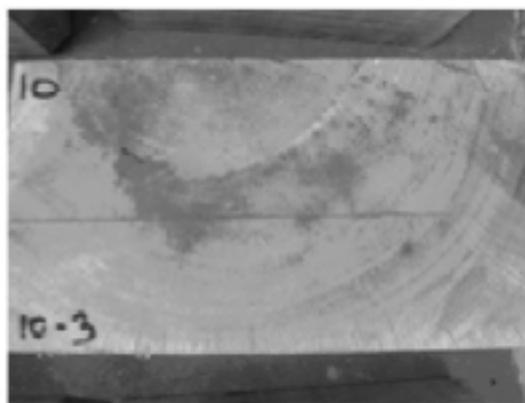


Fig. 19. Muestra 10-3 pulverizada con Cromoazurol-S

correspondería a la zona C de la probeta, presenta una coloración azul más fuerte, que la muestra 10.3, que pertenece a la zona D de la misma probeta

Aspectos económicos

Para realizar un análisis del mercado de durmientes en Argentina, tomamos como caso a una de las concesionarias del servicio que tiene una extensión de vías a cargo de 5000 km.

Para el mantenimiento de vías, la empresa utiliza unos 120000 durmientes/año (período 2007), a un costo de alrededor de U\$S 30 por durmiente impregnado con CCA, con una retención de 10,8 kg/m³ de madera. El consumo de producto CCA comercial al 60% m/m, consumido por durmiente es de aproximadamente 1,40 kg.

El costo del preservador CCA al 60% m/m en el mercado argentino es de cerca de U\$S 3,20 (+ IVA¹⁰) por kg.

Por lo tanto, para el mantenimiento anual de 5.000 km de vías se tendrá un costo de:

Durmientes impregnados U\$S 3.600.000-
Preservador comercial CCA al 60% m/m U\$S 537.600-

De aquí puede estimarse para el mantenimiento anual de los 34.059 km de vías actuales de la red ferroviaria argentina la utilización de más de 820.000 durmientes/año:

Costo de durmientes impregnados:
U\$S 24.522.480¹¹-
Costo del preservador comercial (CCA al 60% m/m): U\$S 3.673.600 -

¹⁰ IVA (Impuesto al Valor Agregado, en la República Argentina)

¹¹ Estos valores son aproximados considerando la utilización de durmientes (2,70 x 0,24 x 0,12 m) que corresponden a trocha ancha.

Estos valores estimativos dan una imagen de la importancia económica de este segmento de la industria de la madera en el mantenimiento de la red ferroviaria.

Conclusiones

De los resultados se afirma que la madera de quebracho blanco presenta una buena permeabilidad al tratamiento realizado con una absorción media de 338 litros/m³ de madera, cuando se aplica una presión de alrededor de 1187 kPa (12 kgf/cm²); para presiones de 784 kPa se obtiene una absorción media de 262 litros/m³ de madera, un valor significativamente menor. El objetivo de trabajar a una presión mayor no es disminuir el tiempo de impregnación sino aumentar la absorción de preservador en la madera, mejorando asimismo su distribución.

Recordar que para la primera impregnación tanto a 1187 como 784 kPa se utilizó un tiempo de una hora. Al realizar la impregnación a rechazo, se incrementan los tiempos de tratamiento, llegando a periodos de presión de aproximadamente 2 h, pero se logra aumentar las absorciones significativamente sin prolongar el periodo en exceso.

Se puede confirmar claramente la influencia de las diferentes presiones aplicadas en el tratamiento y los tiempos de proceso.

Nótese que trabajando con una solución al 3,2 % m/v puede obtenerse una retención teórica de 10,8 kg/m³ de madera, mediante la absorción de 338 litros de solución/m³ de madera trabajando a 1187 kPa. Asimismo puede obtenerse esa retención trabajando a una presión de 784 kPa, con una concentración de 4,1 % m/v, pero se obtendrá una distribución del preservante menos uniforme.

Se concluye que, como se indica en la bibliografía, el proceso es totalmente dependiente de la presión aplicada en el proceso y el tiempo de tratamiento. Quedó demostrado que con la presión de 1187 kPa se obtuvieron, mejores resultados que con 737 kPa. Estos resultados reflejan una más elevada retención y una mayor penetración, además de una distribución más uniforme de preservador.

Las diferencias en la penetración observada

en la madera ocurren debido a diferencia en la anatomía de la especie, la diversidad biológica individual y posiblemente a que algunas probetas presenten el ataque de la mancha roja.

Respecto al origen de la madera no se obtuvieron datos de los cuales pueda observarse una diferencia significativa en las absorciones y retenciones logradas. Por el contrario, de los análisis de densidad efectuados, se obtienen densidades muy próximas para los dos orígenes.

La madera de quebracho blanco puede ser impregnada con preservador tipo CCA en autoclave sin dificultad, dando un buen tratamiento protector. En particular, se podrán obtener durmientes de quebracho blanco con una vida útil prolongada, mediante la aplicación de un tratamiento preservador, en que se tenga en cuenta:

- La humedad de la madera a tratar.
- Las condiciones de tratamiento (Vacío inicial, presión de trabajo, tiempos de aplicación de las presiones mencionadas).
- La concentración adecuada de CCA.

El presente trabajo ha demostrado la factibilidad de una adecuada impregnación, pero que debiera validarse con probetas de esta madera a escala 1:1, por ejemplo de 2,70 x 0,24 x 0,12 m. Por ello, como propuesta de investigación a futuro se programa, realizar un ensayo de impregnación con CCA en autoclave, usando el sistema Bethell, con durmientes de quebracho blanco (con una humedad inferior al 30%) de dimensiones iguales a los más usados habitualmente.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería Química y a la Dirección de Posgrado de la Facultad Regional Buenos Aires de la Universidad Tecnológica Nacional y al Subcomité de Preservación de Madera del IRAM, por el apoyo prestado al presente trabajo.

Asimismo, se expresa el agradecimiento a la empresa ferroviaria NCA por la provisión de los durmientes y a la empresa Tefquim S.A. por la provisión del preservante y por permitir el uso del equipamiento aplicado a los ensayos y análisis.

Referencias

- AITIM (2000). (Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera), Boletín de Información Técnica N° 206, 19-35.
- BOLZON, G. (1988). *Preservantes de la Madera. Serie Didáctica N°1*. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Misiones.
- GARCÍA, R. (1960). *El quebracho blanco en la elaboración de durmientes*. Notas Tecnológicas Forestales Nro.10
- GUINDEO CASASUS, A. (1997). *Especies de maderas para carpintería, construcción y mobiliario*. AITIM, Madrid.
- IACONIS, C. (1957). *Corazón rojo o falso corazón del quebracho blanco*. Rev. de Inv. Forestales 1(4) 39-45.
- LIZARRAGA, A. J. B. (1972). *Efectos del corazón rojo del quebracho blanco en los caracteres del leño*. Memorias del Congreso Forestal Mundial (4) 6375:6376.
- MOGLIA, J. G. (2004). *Presencia del hongo Fusarium scirpii en el leño de Aspidosperma quebracho blanco*. Resultados Preliminares. II Reunión Argentina de Ecología, Mendoza, Argentina.
- NICHOLAS, D. (1973). *Wood Deterioration and Its Prevention by Preservative Treatments*. Volume 2: Preservatives and Preservatives Systems. Syracuse University Press.
- PERAZA SÁNCHEZ, F. (2001). *Protección Preventiva de la Madera*. AITIM, Madrid
- PEREIRA DA SILVA, R, L. (1986). A preservação de dormentes na RFFS/A uma análise
- TINTO, J. C. (1987). *Posibilidades para la producción de durmientes de madera de quebracho*. Informe Técnico, Santa Cruz, Bolivia.
- TORTORELLI, L, (1956). *Maderas y bosques argentinos*. ACME.
- TORTORELLI, L, (1963). *Glosario de términos usados en anatomía de maderas*. Rev. de Inv. Forestales 1(4) 3-32.
- UNLP (Universidad Nacional de La Plata). (2006). *Guiado y elementos de vía*. Cátedra de transportes guiados.

Caracterización radiológica de una instalación relevante¹

Claudia M. Barberis

Comisión Nacional de Energía Atómica, Centro Atómico Constituyentes, Avda. Gral Paz 1499, San Martín, Provincia de Buenos Aires (1650), República Argentina
barberis@cnea.gov.ar

Recibido el 5 de enero de 2009; aceptado el 3 de marzo de 2009

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo la caracterización radiológica de una instalación nuclear, el reactor nuclear RA-1. Por medio de esta caracterización se podrá conocer toda la información sobre la cantidad, el tipo y la distribución de los radionucleidos presentes en la instalación; ello permitirá establecer el orden de magnitud de las actividades que estarán involucradas en la remoción de los distintos materiales, en el momento en que se decida llevar a cabo la clausura de la misma.

PALABRAS CLAVES: CARACTERIZACIÓN RADIOLÓGICA - CLAUSURA DE INSTALACIONES RELEVANTES – RADIONUCLEIDOS - INSTALACIONES NUCLEARES - INVENTARIO RADIOACTIVO

Abstract

The objective of this work is the radiological characterization of a nuclear installation, the RA1 nuclear reactor. This characterization will enable to know all the information about amount, type and distribution of the radionuclides in the installation. Thus, the order of magnitude of the activities that will be involved in the removal of the different materials, at the moment of the decommissioning, will be established.

KEYWORDS: RADIOLOGICAL CHARACTERIZATION – DECOMMISSIONING OF RELEVANT INSTALLATIONS – RADIONUCLIDES – NUCLEAR INSTALLATIONS – RADIOACTIVE INVENTORY

1 Trabajo realizado sobre la base de la tesis presentada por la autora para optar al grado de Magíster en Reactores Nucleares, bajo la dirección de M. Madariaga.

Introducción

La clausura de una instalación nuclear se puede dividir en distintas etapas:

- Caracterización
- Planificación
- Aprobación
- Ejecución

La caracterización involucra las tareas de recopilación de antecedentes, relevamiento de la instalación, conocimiento de la historia de operación, elaboración de los datos obtenidos en el relevamiento y estimación de la actividad de cada componente de la instalación. Esta última tarea se define como caracterización radiológica, la que requiere de las tareas previas mencionadas.

La etapa de planificación, como su nombre lo indica, involucra a todas las tareas de detalle de actividades a realizar, esto es, se eligen las tecnologías apropiadas de descontaminación y desmantelamiento y la forma en que se van a llevar a cabo. Una vez terminada la planificación se solicita la aprobación a la autoridad de control competente; luego de su obtención comienza la ejecución de las tareas identificadas anteriormente, es decir comienza a ponerse en práctica todo lo planificado.

Los combustibles irradiados y los fluidos del núcleo deben ser removidos luego de la parada del reactor y antes de las tareas de clausura. El tratamiento, en este caso, es diferente al de los demás componentes de la instalación, que son removidos durante la clausura.

Este trabajo está enfocado exclusivamente a la caracterización radiológica de cada uno de los componentes de la instalación del Reactor Nuclear RA-1.

Breve descripción del Reactor RA-1

El RA-1 es un reactor nuclear de experimentación, de construcción enteramente nacional, que se encuentra ubicado en el Centro Atómico Constituyentes de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). En las figuras 1 (a) y 1(b) se pueden apreciar dos vistas del mismo.



Fig. 1a. Reactor RA-1

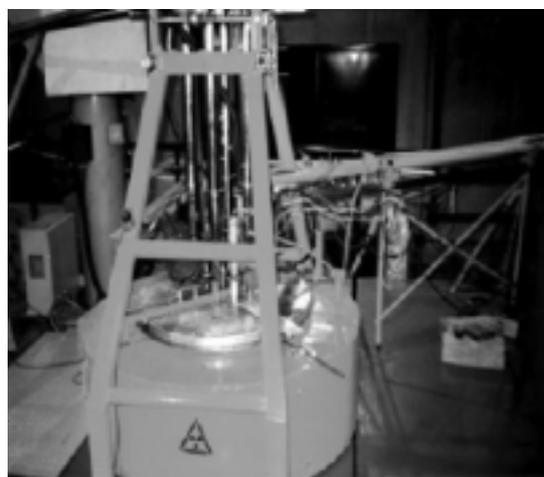


Fig. 1 b. Reactor RA-1

Este reactor fue puesto a crítico en 1958 y a la fecha sigue operativo prestando entre otros, los siguientes servicios:

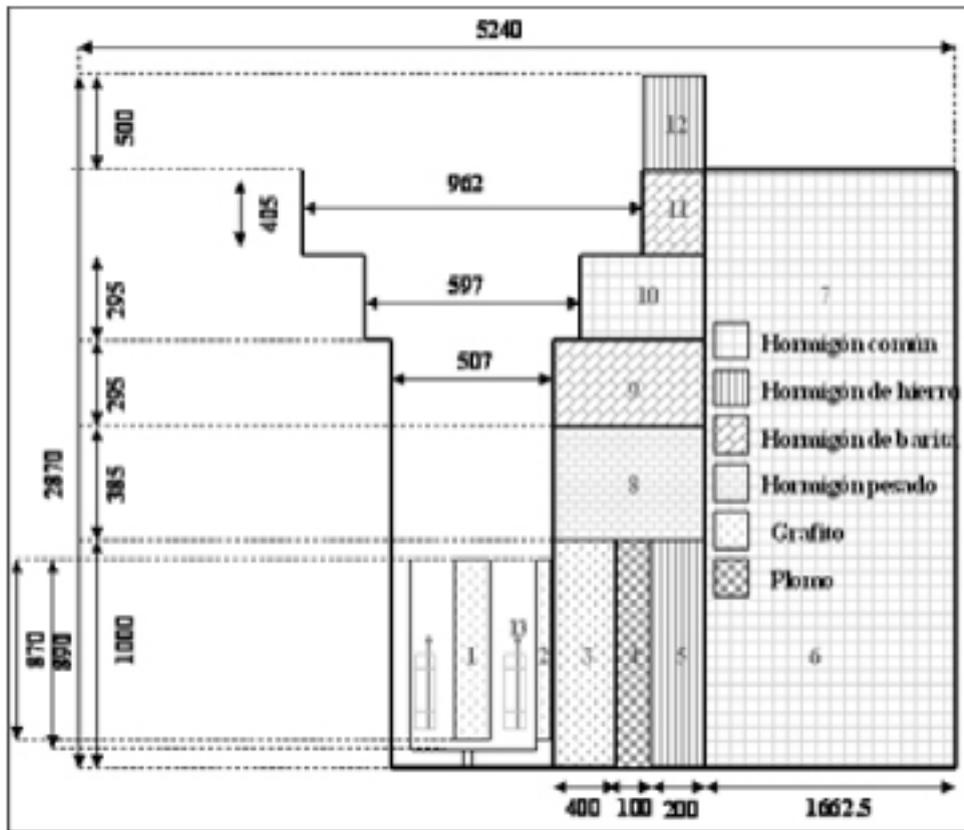
- Ensayos experimentales e irradiación de muestras para mediciones de parámetros nucleares.
- Irradiación de células en cultivos y hámster para estudios de terapia por captura neutrónica en boro (BNCT).
- Irradiaciones de muestras para determinar el daño por radiación en metales, celdas solares, cables, fibra óptica, gomas y otros materiales.
- Irradiación de cabellos y sangre para aplicaciones médicas.
- Irradiaciones diversas para determinar contenidos de impurezas en materiales y alimentos, por medio del análisis por activación.
- Actividades docentes de perfeccionamiento de profesionales y técnicos.

- Actividades de divulgación para estudios antes universitarios, terciarios y secundarios.

El moderador y refrigerante es agua liviana desmineralizada

El reactor tiene actualmente una potencia autorizada de 40 kW térmicos; es del tipo tanque abierto, con núcleo de uranio enriquecido al 19.71 % en 235U y reflector de grafito.

En la figura 2 se puede observar un corte del reactor, sus componentes, materiales y dimensiones.



1	Grafito Central
2	Grafito Interior
3	Grafito Exterior
4	Blindaje de Plomo
5	Blindaje de Hormigón de Hierro
6	Blindaje de Hormigón Común
7	Blindaje de Hormigón Común
8	Blindaje de Hormigón Pesado
9	Blindaje de Hormigón de Barita
10	Blindaje de Hormigón Común
11	Blindaje de Hormigón de Barita
12	Blindaje de Hormigón de Hierro
13	Elemento Combustible

Figura 2. Corte del Reactor Nuclear RA-1

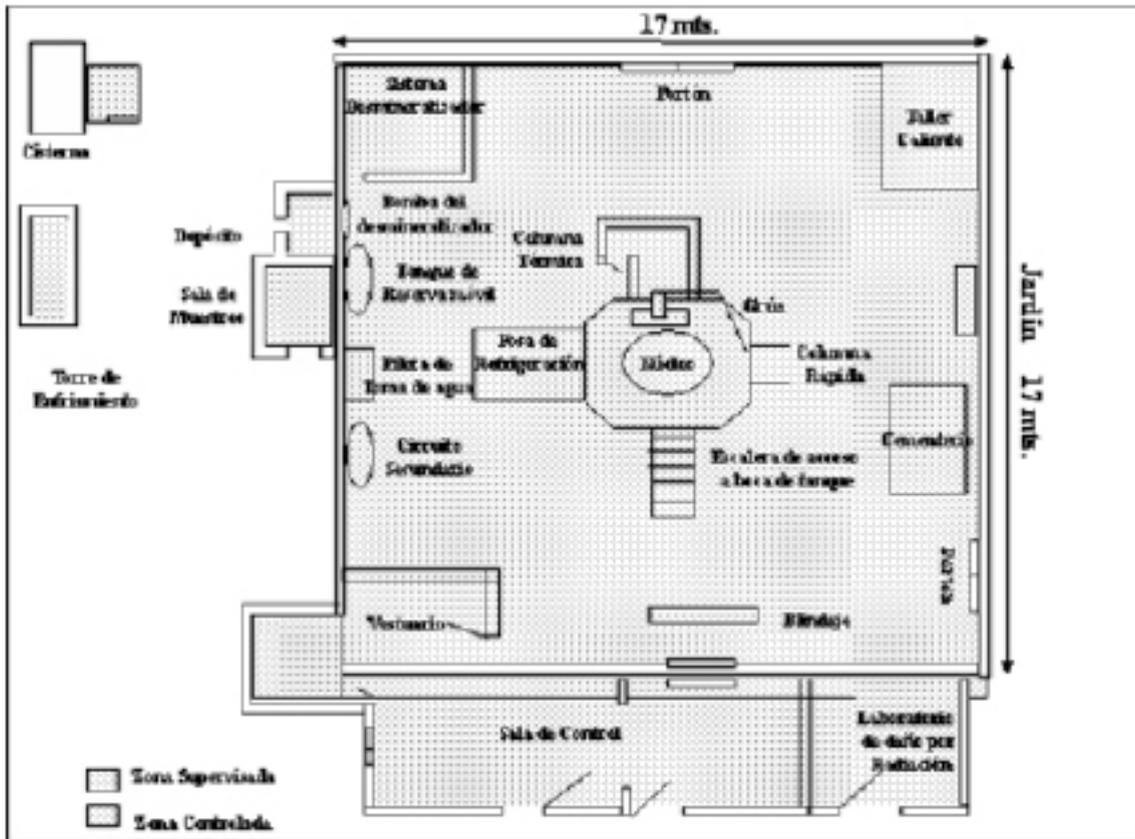


Fig. 3. Recinto del Reactor Nuclear RA-1

En la figura 3 se ve el recinto del Reactor y todos los componentes dentro del mismo.

Desarrollo

El proceso de caracterización involucró las siguientes tareas:

- Revisión de toda la información disponible de la instalación.
- Implementación de esquemas de cálculo. (Dos esquemas independientes).
- Ejecución de medidas y análisis.
- Comparación de los resultados calculados y los datos medidos.

A continuación se describe brevemente cada una de las mismas

Revisión de toda la información disponible de la instalación

El primer paso consistió en crear una base de datos con toda la información disponible del Reactor, materiales existentes, tipo de combus-

tible, historia de operación, etc. (Barberis, 2001). Dicha base de datos fue de gran utilidad para este trabajo y podrá ser utilizada además para otras gestiones concernientes a la instalación.

Implementación de Métodos de Cálculo

La metodología de cálculo utilizada para la caracterización radiológica del Reactor RA-1, se basó en un primer esquema, en el uso de ciertos códigos que se encuentran disponibles dentro de un paquete denominado MTR_PC desarrollado por INVAP S.E (1995), empresa rionegrina asociada a la Comisión Nacional de Energía Atómica.

Estos códigos son: WIMS (Halsall, 1980); CITVAP (Villarino y Lecot, 1995); ANISN (Oak Ridge National Laboratory, 1973) y ORIGEN-2 (Oak Ridge National Laboratory, 1980).

Los códigos WIMS, CITVAP y ANISN se utilizaron para determinar un mapa de flujo neutrónico

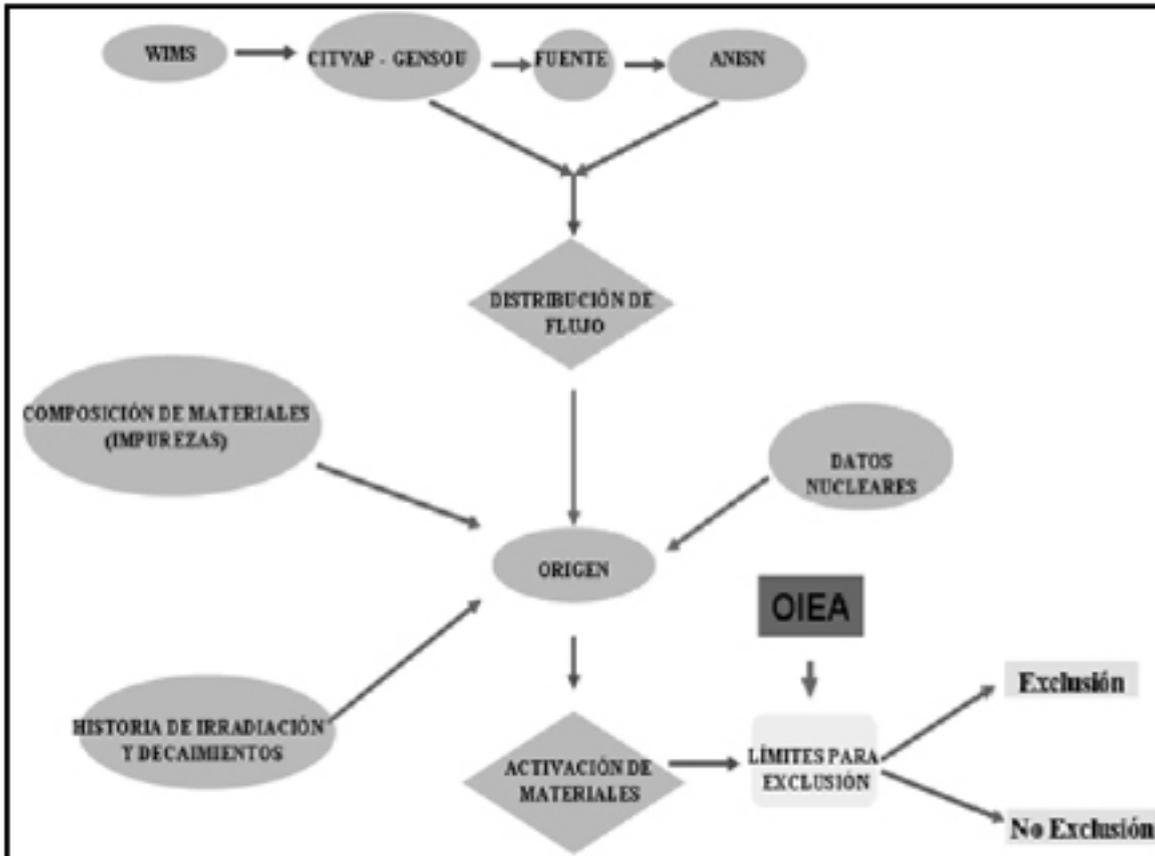


Figura 4. Primer Esquema de Cálculo

dentro de la instalación.

El código ORIGEN se usó para simular la irradiación de cada grupo de materiales y componentes, utilizando el valor de flujo neutrónico previamente calculado. Con ello se obtuvo una estimación del inventario radiactivo; adicionalmente se clasificó a cada grupo o componente dentro de las categorías de excluidos o no de los controles regulatorios. Se adoptaron para ello criterios del Organismo Internacional de Energía Atómica (International Atomic Energy Agency, 1996 y 2004).

En la figura 4 se puede ver el primer esquema de cálculo.

Como complemento de este esquema se realizó un segundo esquema de cálculo, con base en el uso del código MCNP (Los Alamos National Laboratory, 2005).

El objeto del esquema con MCNP fue validar los resultados generados con el primer esquema. Para ello se elaboró un modelo detallado

de la instalación (3 D), pero solamente se hicieron cálculos con MCNP en algunos puntos del blindaje hacia adentro, es decir, no se obtuvo la distribución de flujo fuera del blindaje del reactor. Esto se implementó de esta forma porque al no utilizar técnicas sofisticadas los cálculos en zonas muy alejadas podrían llevar mucho tiempo de cálculo. En particular, con MCNP se calculó usando el detector puntual y la malla de puntos.

En la figura 5 se puede ver el segundo esquema de cálculo.

En la tabla 1 se observa la comparación de los resultados obtenidos con ambos esquemas.

Ejecución de medidas y análisis

Paralelamente al cálculo se adquirieron datos experimentales dentro de algunas de las facilidades, midiendo con diferentes métodos e instrumentos. Esta tarea estuvo a cargo del sector responsable de mediciones de Física de Reactores.

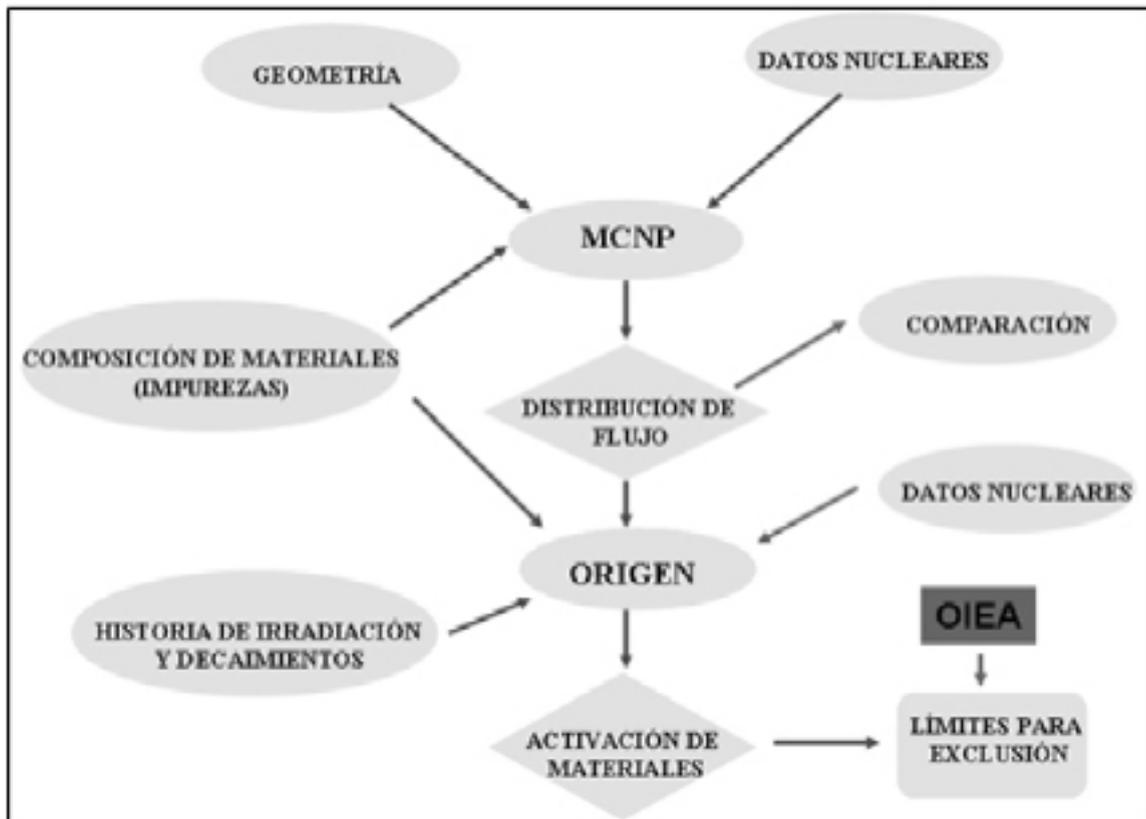


Figura 5. Segundo Esquema de Cálculo

Identificación	Flujo Neutrónico Térmico (0eV<E<0.4eV) Esquema Sencillo	Flujo Neutrónico Térmico (0eV<E<0.4eV) (MCNP, Detector Puntual)	Flujo Neutrónico Térmico (0eV<E<0.4eV) (MCNP, malla de puntos)
Grafito Central	7.67E+11	-----	(7.54±0.04)E+11
Tanque Separador	6.29E+11	(8.40±0.01)E+11	-----
Tanque del Reactor	8.67E+10	(6.72±0.06)E+10	-----
Tanque del Reactor	5.70E+11	(2.23±0.04)E+11	-----
Grafito Interior	6.10E+11	-----	(6.35±0.04)E+11
Grafito Exterior	2.64E+11	(1.86±0.04)E+11	-----
Blindaje de Plomo	5.28E+10	(2.11±0.08)E+10	-----
Bloque de Hormigón Pesado	3.83E+08	(4.2±0.33)E+09	-----
Grafito Columna Térmica	8.33E+10	(4.83±0.28)E+10	(4.22±0.08)E+10
Plomo de la Columna Térmica	9.67E+08	(7.35±0.88)E+08	-----

Tabla 1. Flujo Neutrónico Térmico obtenido con ambos esquemas

Ubicación	Medida experimental detector de Rodio	Modelo MCNP
Reflector central 0eV<E<0.4eV Aire	$\phi^{(RC)} (Z=53.4 \text{ cm}) = (6.8 \pm 0.7) \cdot 10^{11}$	$\phi^{(RC)} (Z=53.4 \text{ cm}) = (7.4 \pm 0.1) \cdot 10^{11}$
Reflector interior 0eV<E<0.4eV Aire	$\phi^{(RI)} (Z=53.4 \text{ cm}) = (5.6 \pm 0.6) \cdot 10^{11}$	$\phi^{(RI)} (Z=53.4 \text{ cm}) = (6.4 \pm 0.1) \cdot 10^{11}$

Tabla 2a. Comparación de los resultados experimentales obtenidos con un detector de rodio y los obtenidos con el cálculo con MCNP

Ubicación	Medida experimental Hojuelas	Modelo MCNP
Reflector central 0eV<E<0.1eV Aire	$\phi^{(RC)} (Z=43.4 \text{ cm}) = (6.3 \pm 0.6) \cdot 10^{11}$ $\phi^{(RC)} (Z=63.4 \text{ cm}) = (5.9 \pm 0.6) \cdot 10^{11}$	$\phi^{(RC)} (Z=43.4 \text{ cm}) = (7.2 \pm 0.1) \cdot 10^{11}$ $\phi^{(RC)} (Z=63.4 \text{ cm}) = (6.6 \pm 0.09) \cdot 10^{11}$
Núcleo 0eV<E<0.1eV Agua	$\phi^{(COM)} (Z=53.4 \text{ cm}) = (1.22 \pm 0.2) \cdot 10^{12}$	$\phi^{(COM)} (Z=53.4 \text{ cm}) = (1.25 \pm 0.03) \cdot 10^{12}$
Columna térmica 0eV<E<0.1eV Aire	$\phi^{(RC)} (Y=118 \text{ cm}) = (1.86 \pm 0.6) \cdot 10^8$	$\phi^{(RC)} (Y=118 \text{ cm}) = (1.70 \pm 0.2) \cdot 10^8$

Tabla 2b. Comparación de los resultados experimentales obtenidos con hojuelas y los obtenidos con el cálculo con MCNP

Comparación de los resultados calculados y los datos medidos

Se hizo una comparación de los resultados medidos con los calculados.

En las tablas 2a y 2b se puede observar la comparación entre los resultados experimentales y el modelo MCNP en distintas coordenadas, en dos tipos de experiencias distintas.

- Blindaje de Hormigón pesado.
- Reflector central de grafito.
- Reflector radial interior.
- Reflector radial exterior.
- Grafito de la columna térmica.
- Sector del piso del recinto debajo del blindaje del Reactor.
- Paredes del sótano. (Solo las que se corresponden con la cruz por debajo del reactor).

Resultados

Los cálculos realizados muestran que las zonas de la instalación cuya actividad no permite su exclusión son las siguientes:

- Tanque del Reactor y componentes ubicados en su interior (grilla de EC, tubos soportes, tanque separador).
- Barras de Control.
- Sistema de movimiento neumático de muestras.
- Blindaje de Plomo.
- Blindaje de Plomo de la columna térmica.
- Blindaje de Hormigón de hierro.
- Blindaje de Hormigón de Barita.

Salvo el sector mencionado anteriormente, las paredes, el techo y el piso del recinto pueden ser excluidos, sin ninguna restricción. Lo mismo sucede en los circuitos primario y secundario, el sistema de purificación y demás componentes que no fueron mencionados en el apartado anterior, como resultado de la activación de los componentes originales. No es competencia de este trabajo el estudio de la posible activación de productos de corrosión que pudieran estar presentes en dichos componentes.

En la tabla 3 se pueden observar los radionucleidos calculados en el grafito de la columna térmica.

Nucleidos	Actividad específica (Bq/g)	Periodo (a)
³ H	1,57E+02	1,23E+01
¹⁰ Be	3,59E-02	1,60E+06
¹⁴ C	2,65E+00	5,73E+03
³⁵ S	6,52E+00	2,40E-01
³⁶ Cl	2,35E-01	3,01E+05
³⁷ Ar	2,68E-02	9,59E-02
³⁹ A	1,34E+00	2,69E+02
⁴¹ Ca	2,51E-02	1,03E+05
⁴⁵ Ca	2,16E+00	4,46E-01
⁴⁶ Sc	3,66E-02	2,30E-01
⁵⁴ Mn	3,39E-01	8,57E-01
⁵⁵ Fe	5,74E+00	2,70E+00
⁵⁸ Co	1,32E-02	1,94E-01
⁶⁰ Co	3,44E+01	5,27E+00
⁶³ Ni	1,11E-01	1,00E+02
⁶⁵ Zn	2,28E-01	6,70E-01
^{110m} Ag	1,54E-02	6,85E-01
^{119m} Sn	4,92E-02	8,03E-01
¹²⁴ Sb	1,43E-02	1,65E-01
¹²⁵ Sb	7,00E-02	2,77E+00
^{129m} Te	1,71E-02	1,59E-01
¹⁵¹ Sm	1,83E-02	9,00E+01
¹⁵² Eu	9,30E+00	1,36E+01
¹⁵⁴ Eu	1,30E+00	8,80E+00
¹⁵⁹ Eu	4,47E-02	4,96E+00
¹⁵³ Gd	2,69E-02	6,62E-01
¹⁸² Ta	4,69E-01	3,14E-01
¹⁸⁵ W	6,05E-02	2,06E-01
Total	2,22E+02	

Tabla 3. Cálculo de actividad de radionucleidos en el grafito de la columna térmica del Reactor Nuclear RA-1

Con respecto a los radionucleidos totales de la instalación, una vez eliminados aquellos con periodo inferior a seis meses, el ⁵⁵Fe es el que encabeza la lista. En cuanto a actividad, le siguen ⁵⁴Mn, ⁶³Ni y ³⁹Ar, en sentido decreciente de actividad pero siempre dentro del mismo

orden; los restantes tienen un aporte entre 0.5 % y 0.01 % al total de actividad. (Ver Figura 4).

El ⁵⁵Fe aparece como producto de activación de los aluminios, encabizando la lista según su actividad; le siguen ⁵⁴Mn, ⁶³Ni y ⁶⁵Zn.

Radionucleido	Ci	Bq	Periodo (a)
⁵⁵ Fe	1.26E+01	4.65E+11	2.70E+00
⁵⁴ Mn	7.42E-01	2.75E+10	8.57E-01
⁶³ Ni	4.05E-01	1.50E+10	1.00E+02
³⁹ Ar	1.96E-01	7.24E+09	2.69E+02
³ H	7.47E-02	2.76E+09	1.23E+01
¹²⁵ Sb	4.77E-02	1.77E+09	2.77E+00
^{119m} Sn	3.40E-02	1.26E+09	8.03E-01
⁶⁵ Zn	2.17E-02	8.04E+08	6.70E-01
⁶⁰ Co	1.76E-02	6.52E+08	5.27E+00
⁴¹ Ca	1.30E-02	4.81E+08	1.03E+05
¹⁰⁹ Cd	7.51E-03	2.78E+08	1.27E+00
¹⁴ C	4.02E-03	1.49E+08	5.73E+03
¹⁵² Eu	4.03E-03	1.49E+08	1.36E+01
⁵⁹ Ni	3.37E-03	1.25E+08	7.50E+04
⁴⁰ K	1.41E-03	5.22E+07	1.28E+09
¹⁵⁴ Eu	4.75E-04	1.76E+07	8.80E+00
³⁶ Cl	2.46E-04	9.12E+06	3.01E+05
¹⁰ Be	3.74E-05	1.38E+06	1.60E+06
^{115m} Sm	2.29E-05	8.46E+05	9.00E+01
¹⁵³ Gd	1.62E-05	6.01E+05	6.62E-01
¹⁵⁵ Eu	1.58E-05	5.85E+05	4.96E+00
¹³³ Ba	8.39E-06	3.11E+05	1.05E+01
^{110m} Ag	1.04E-06	3.85E+04	6.85E-01
²⁰⁴ Pb	6.04E-13	2.23E-02	1.40E+17
Total	1.41E+01	5.23E+11	

Tabla 4. Radionucleidos relevantes en el Reactor Nuclear RA-1

En lo que respecta al hormigón común encabeza la lista de radionucleidos el ⁴⁰K, luego el ⁵⁵Fe, el ⁴⁵Ca y por último el ³⁹Ar.

En cambio, en hormigón de hierro y pesado encabeza la lista el ⁵⁵Fe, le siguen ⁵⁴Mn, ⁴⁵Ca y ³⁵S. En el hormigón de barita el ⁵⁵Fe es también quien encabeza la lista; le siguen ¹³³Ba, ⁵⁴Mn y ⁴⁵Ca.

En el plomo aparece como producto de activación preferencial el ¹²⁴Sb, con aproximadamente un aporte del 98 % del total de la actividad del componente.

En los aceros inoxidables el ⁵⁵Fe aporta aproximadamente un 90 % del total de actividad; le sigue el ⁵⁴Mn.

En los bloques de grafito el producto de activación predominante es el ³H con aproximadamente un 70 % del aporte total, luego el ⁶⁰Co y el ¹⁵²Eu.

En la tabla 4 se pueden observar los radionucleidos más relevantes presentes en el Reactor Nuclear RA-1.

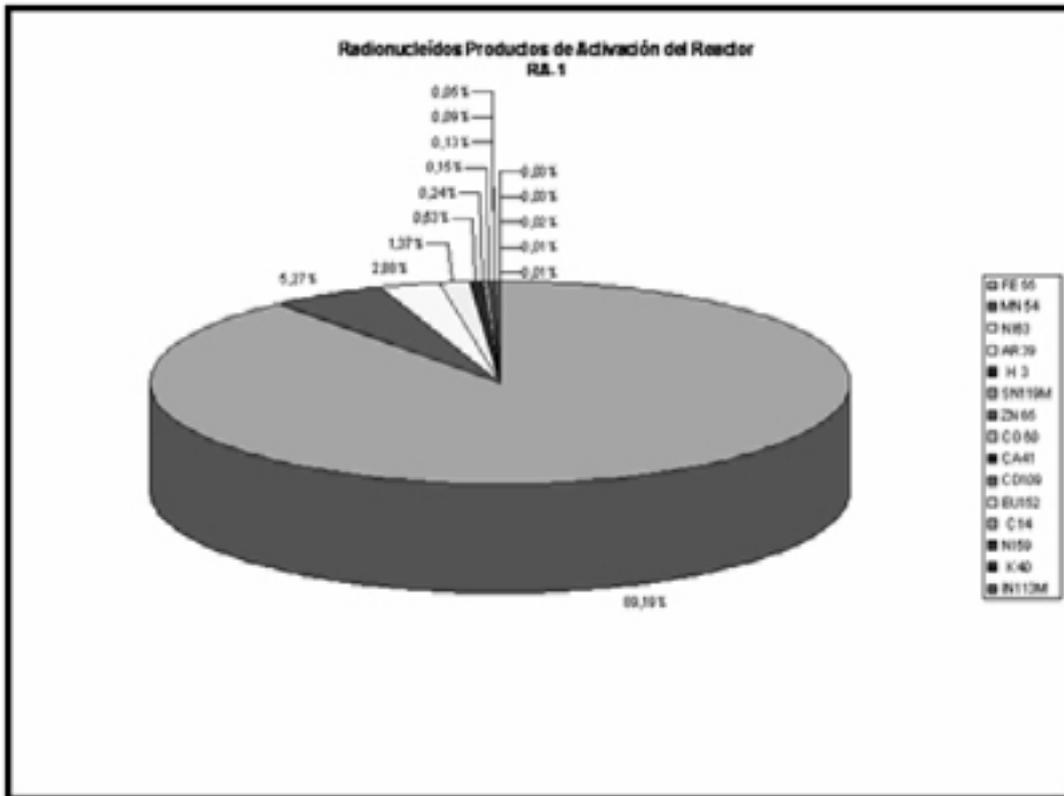


Figura 4. Radionucleidos totales en el reactor RA-1

En la figura 4 se grafican los resultados de la tabla anterior.

Conclusiones

La composición de los materiales utilizados en la construcción de la instalación y sobre todo la cantidad y tipo de impurezas, son un factor crítico de contribución a la cantidad total de activación inducida.

Es importante mencionar que, como se trata de una instalación que inició sus operaciones hace 50 años, gran cantidad de información se ha perdido, sobre todo aquella relacionada con la composición y las impurezas anteriormente mencionadas.

Es por ello, y dada la gran necesidad de contar con esa información, que se decidió, en los casos de incertidumbre, utilizar composiciones o impurezas típicas de los materiales en cuestión.

Otros factores no menos importantes de contribución a la actividad total inducida son la historia de operación y el conocimiento de incidentes durante la vida de la instalación

Otra cuestión no menos importante proviene, en el primer esquema, del modelo simplificado que se utilizó, (códigos de transporte unidimensionales a los que se le han hecho aproximaciones en algunos casos apreciables). En el caso del segundo esquema, se ha obtenido una mejora en cuanto a las aproximaciones del modelo, pero no con las incertidumbres en las composiciones también existentes para este modelo; es por ello que se considera oportuno encarar en los periodos de mantenimiento del reactor la toma de muestras y efectuar un análisis detallado de cada una de las partes constitutivas a las que se pueda tener acceso, con el objeto de conocer con la mayor exactitud posible la composición del material en cuestión y la cantidad y el tipo de impurezas presentes.

Para el primer esquema de cálculo, si bien se han utilizado mayor cantidad de horas-hombre en la gestión y correlación de los modelos, el tiempo de cálculo (CPU) empleado fue mucho menor.

En el esquema con MCNP se han requerido tiempos de CPU bastante largos, pero se han obtenido resultados aceptables y fuera de los rangos de cuestionamiento.

Por todo esto podemos concluir que cuando se requiera hacer un cálculo sin mayores detalles el esquema original puede resultar válido, ya que permite tener una idea de los valores de flujo neutrónico estimable.

En cambio, cuando sea necesario un detalle mucho más fino y una mayor precisión en los resultados es recomendable el cálculo con el código MCNP. Por otra parte, en este último caso, sería conveniente hacer el cálculo más eficiente utilizando alguna técnica de reducción de varianza o simplemente trabajar con varios modelos y calcular en cada uno de ellos una fuente que pueda ser utilizada para evaluar el flujo a medida que nos alejamos del núcleo, inclusive fuera del blindaje. Otra alternativa sería utilizar códigos deterministas de transporte 2D o 3D, tales como el DOT o el DORT, que proporcionan además del valor del flujo solicitado el cálculo de fuentes para calcular nuevos flujos más alejados.

Para la elaboración de los esquemas de cálculo implementados se ha hecho un trabajo exhaustivo de recolección de datos acerca de la vida y la operación de la instalación (historia de operación e incidentes, relevamiento completo de los materiales y componentes

que se encuentran en la misma, entre otros).

Todo este trabajo de recolección de datos resultó muy importante, ya que hasta el momento no se disponía de los mismos.

Otro aporte muy útil para la instalación fue poder disponer de un modelo detallado de la instalación con MCNP, que podrá ser utilizado para cualquier otra evaluación.

Este trabajo se podrá utilizar como base para la elaboración del Plan Preliminar de Retiro de Servicio de la instalación, documento de carácter mandatorio que debe producir la entidad Responsable, exigido por la Autoridad Regulatoria Nuclear.

La metodología utilizada en este trabajo también podrá ser útil, adaptada convenientemente a cada caso, para la elaboración del Programa de Desmantelamiento necesario para obtener la licencia de desmantelamiento tanto de un Reactor de Investigación (RA-1, RA-3, RA-6) como de una central de potencia (ATUCHA I, ATUCHA II, EMBALSE). Este documento también es de carácter mandatorio, según lo exigido por la Autoridad Regulatoria Nuclear.

Referencias

- BARBERIS, C. M. (2001) *Base de Datos para el Estudio de un futuro Desmantelamiento del Reactor RA-1*. Informe CNEA.C.RCN.ITE.155.
- HALSALL, M. J (1980) *WIMSD4: Input Options*. Informe AEEW - M1327.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (1996). *Clearance Levels for Radionuclides in Solid Materials*. Application of Exemption Principles. Interim Report for Comment". IAEA - TECDOC – 855, IAEA, Vienna, Austria.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (2004) *Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance*". Safety Guide No. RS-G-1.7. IA. IAEA, Vienna, Austria.
- INVAP SE (1995) MTR_PC : *Modular Code System for Neutronics, Thermalhydraulics and Shielding Calculations*. División de Ingeniería Nuclear, INVAP SE. San Carlos de Bariloche, Argentina. RSICC CODE PACKAGE CCC-674 (1995).
- LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY (2005) MCNP — *A General Monte Carlo N-Particle Transport Code*", Version 5. Los Alamos, Estados Unidos.
- OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY (1973) ANISN: *Multigroup One- Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering*"Informe RNL RSIC CCC, 254. (Versión extendida en MTR_PC, INVAP).
- OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY.(1980) ORIGEN II: *Isotope Generation and Depletion Code*", Informe ORNL CCC_371.
- VILLARINO, E.; LECOT, C. (1995) CITVAP 3.1: *A Reactor Calculation Code, included in the MTR_PC System*. División de Ingeniería Nuclear, INVAP SE. San Carlos de Bariloche, Argentina.

De la primera radiografía al primer tomógrafo por emisión de positrones argentino

Claudio Verrastro,¹⁻² Martín Belzunce,² Juan Carlos Gomez,¹⁻³ Daniel Estryk,¹ Esteban Venialgo,¹ Fernando Carmona,² Damián De Biase²

¹ Comisión Nacional de Energía Atómica, Instrumentación y Control, Centro Atómico Ezeiza, Provincia de Buenos Aires (B1802AYA), República Argentina

² Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Av. Medrano 951 (C1179AAQ), Buenos Aires, República Argentina

³ Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Parque Tecnológico Miguelete, Av. General Paz 5445 (B1650KNA) Provincia de Buenos Aires, República Argentina

cverra@cae.cnea.gov.ar

Recibido el 15 de diciembre de 2008; aceptado, en versión revisada, el 2 de marzo de 2009.

Resumen

A partir de una revisión histórica de las técnicas de diagnóstico por imágenes se introducen los requerimientos para el diseño del primer Tomógrafo por Emisión de Positrones (PET) en desarrollo en la Argentina. Se emplean cristales de bajo costo de NaI (TI) de 400 x 300 x 2,5 mm³, en geometría hexagonal y electrónica totalmente digital, con capacidad de procesamiento distribuido. La arquitectura propuesta permite reducir la tasa de transferencia de datos entre las capas y amplía la capacidad de procesamiento hasta 1,2 107 eventos individuales por segundo. El diámetro de apertura del anillo es 600 mm y la longitud axial es de 300 mm. El pórtico permite la rotación continua alrededor del campo de visión en forma sincrónica con el movimiento de la camilla, esta adquisición en modo helicoidal evita zonas muertas y mejora la uniformidad y la resolución espacial.

PALABRAS CLAVE: PET DE BAJO COSTO, PROCESAMIENTO DISTRIBUIDO, MODO HELICOIDAL

Abstract

From an historical review of the techniques of images diagnosis the technical requirements for the design of the first positron emission tomography (PET) scanner under development in Argentina. It uses low cost planar NaI(Tl) detectors of 400 x 300 x 2,5 mm³ in hexagonal arrangement. Fully digital electronics with distributed processing capability enable the implementation of advanced algorithms. The proposed architecture reduces the data transfer ratio and extend the processing capacity up to 1.2 107 individual events per second. The aperture diameter of the ring is 600 mm and the axial length is 300 mm. The gantry allows continuous rotation around the field of view (FOV) synchronously with the bed movement. The acquisition in helicoidal mode avoids dead zones and improves spatial resolution.

KEYWORDS: LOW COST PET, DISTRIBUTED PROCESS, HELICOIDAL MODE

INTRODUCCIÓN

Las técnicas de diagnóstico por imágenes tienen su origen en la radiografía, cuando en la noche de 8 de noviembre 1895, el físico austriaco Wilhelm Conrad Röntgen, experimentando con el tubo de Crookes [1] descubre accidentalmente los rayos X (Fig 1). El impacto social de este descubrimiento fue inmenso y de inmediato se visualizó su potencial en múltiples aplicaciones, en especial las médicas.



Fig. 1. Imagen de la mano de la esposa de Roentgen (reproducido de www.google.com/images)

Fue Madame Curie quien impulsó definitivamente el uso de la radiografía en el diagnóstico y el tratamiento médico, intensivamente usada para la localización de proyectiles (Fig. 2) y fracturas en los heridos durante la primera guerra mundial.

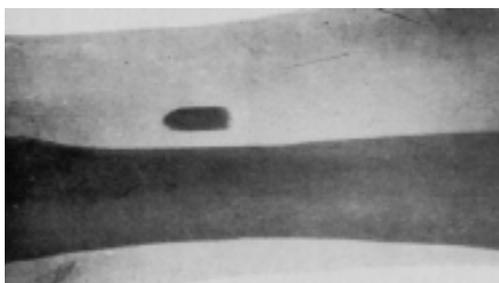


Fig. 2. Región inferior de la pierna derecha, proyectil alojado a la izquierda de la tibia (reproducida de Archivos Médicos Belgas, abril de 1896, pp. 328)

Más recientemente su uso fue casi universal para el diagnóstico y la prevención de infecciones pulmonares y tuberculosis (Fig. 3); casi toda la población ha pasado por la experiencia

de "posar" para la obtención de una radiografía de rayos X (RX).

La imagen plana obtenida es de transmisión o "transparencia" y muestra la diferencia de atenuación sufrida por los rayos X, al atravesar el cuerpo del paciente (Fig. 4). Estas imágenes proveen información de la "densidad" de los órganos internos usualmente en 128 niveles de gris y de su localización espacial en dos dimensiones (2D).

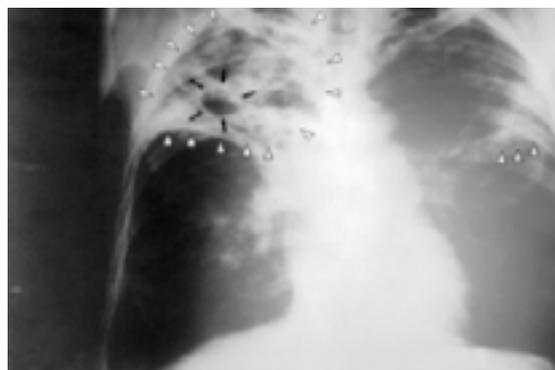


Fig. 3. RX anteriorposterior de un paciente con tuberculosis en ambos pulmones (reproducida de <http://phil.cdc.gov/phil/home.asp> ID#: 2543 US Dep. Health and Human Services)

A diferencia de lo que ocurre con la fotografía óptica, no es necesario el empleo de lentes, o colimadores como lo hace la cámara oscura, para lograr la correspondencia biunívoca entre puntos del objeto y de la imagen (Kepler, 1604). En este caso la fuente de radiación es puntual como se muestra en la Fig. 5; la imagen se obtiene al colocar la placa sensible directamente detrás del objeto.

La producción de estas imágenes es relativamente simple; sólo es necesario una fuente de rayos X y un material sensible que esencialmente es el mismo que se emplea en la fotografía óptica (En la práctica, el chasis radiográfico que aloja la película fotográfica es una caja hermética, que contiene dos pantallas reforzadoras, construidas con sustancias fluorescentes que se iluminan al incidir los rayos X, mejorando notablemente la sensibilidad).

Pero por otra parte, al ser una imagen bidimensional, se producen fenómenos de superposición y apantallamiento que dificultan su interpretación; es así que desde los albores de la radiografía existió un marcado interés en la

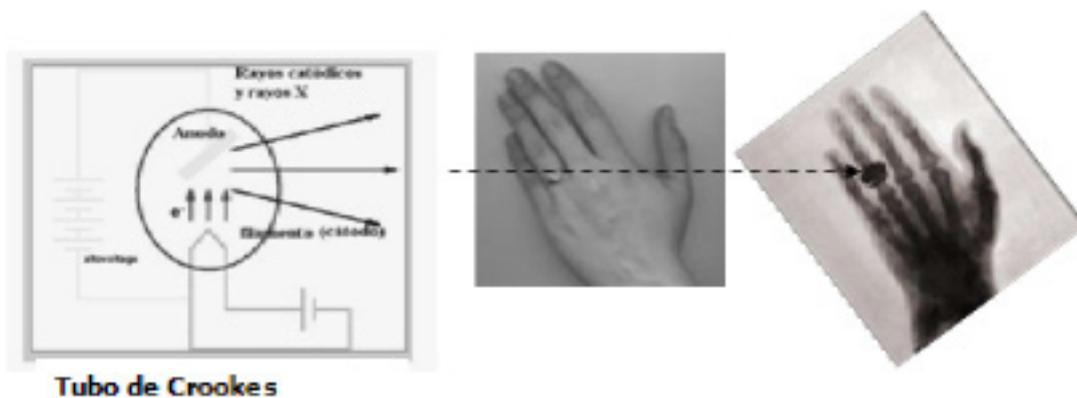


Fig. 4. Imagen de contacto producida por una fuente de radiación puntual.

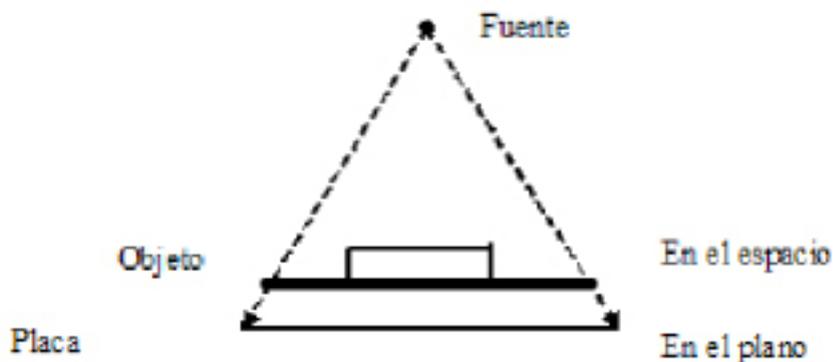


Fig. 5. La fuente puntual hace innecesario el empleo de lentes para la producción de la imagen

obtención de imágenes tridimensionales que pudieran separar en distintos planos la profundidad del objeto bajo estudio.

Las fórmulas matemáticas (ver ecuación 1) para reconstruir una imagen tridimensional a partir de múltiples imágenes axiales planas fueron desarrolladas por Radon en 1917 (Deans, 1983).

1-

$$\mathfrak{R}(s, \phi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x \cos \phi - u \sin \phi, x \sin \phi + u \cos \phi) du$$

La operación que se realiza al obtener una imagen radiográfica (Fig. 6) es una proyección en el plano de la imagen de los cortes del objeto.

Esta operación es la que expresa la transformada de Radon $\mathfrak{R}(s, \phi)$ de una función $f(x, y)$ como la integral de línea de los valores de $f(x, y)$ a lo

largo de la recta AA' inclinada un ángulo ϕ desde el eje x , desplazado una distancia s desde el origen. A esta recta se la llama Línea de Respuesta o LOR (Line of response)

Si se desea obtener el corte $f(x, y)$ del objeto, se deberá realizar la operación inversa, la antitransformada de Radon (ecuación 2). Para poder resolverla se deberán obtener infinitas (muchas) imágenes alrededor del objeto, con eje de rotación z perpendicular al plano de los cortes xy .

$$2- f(x, y) = \int_0^{2\pi} \mathfrak{R}[f](\phi, x \cos \phi + y \sin \phi) \cdot d\phi$$

Pero recién en 1967 Allan M. Cormack publica sus trabajos sobre la TAC y Godfrey Hounsfield (Hounsfield, 1973) utilizando una computadora digital en 1972, construye en Gran Bretaña el

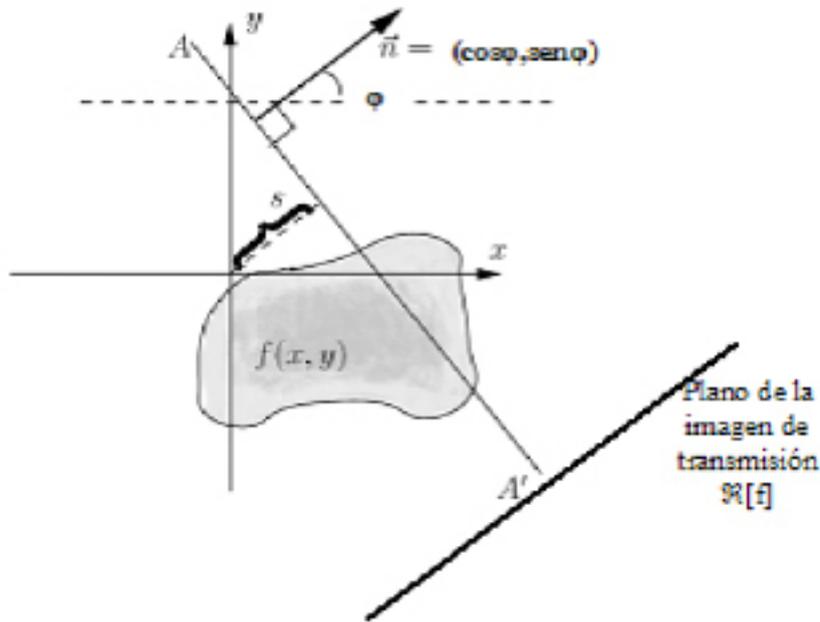


Fig. 6. Expresión de una imagen de transmisión como la transformada de Radon de un corte tomográfico.

el primer Tomógrafo Axial Computado (TAC) que al rotar el cabezal alrededor del eje del paciente adquiere las múltiples vistas necesarias para la reconstrucción tomográfica del cráneo del paciente.

Como es necesario un tiempo para obtener cada imagen y la precisión con que se puede posicionar el cabezal tiene un límite, se trabaja con un número discreto de vistas (128 a 256); entonces la integral de la ecuación 2 se transforma en sumatoria. Estas vistas, que se llaman sinogramas, son almacenadas en las coordenadas (Φ, s) . En la Fig. 7 se puede ver que un punto en el plano de corte transversal x, y produce una imagen sinusoidal en coordenadas (Φ, s) .

Existen diversos métodos de reconstrucción tomográfica (Bruyant, 2002); el más simple es la retroproyección, que consiste en redibujar sobre el plano x, y cada punto del sinograma que representa la intensidad de la radiación sobre línea de inclinación Φ que pasa a una distancia s del centro de coordenadas (x_0, y_0) , puede ser implementado eficientemente en forma digital (Fig. 8).

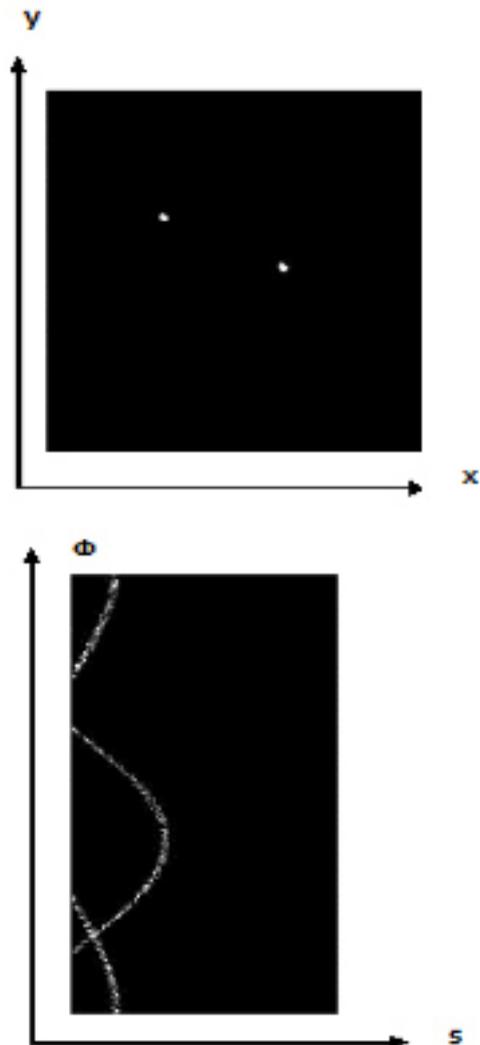


Figura 7: Corte de dos puntos (arriba) y su sinograma (abajo)

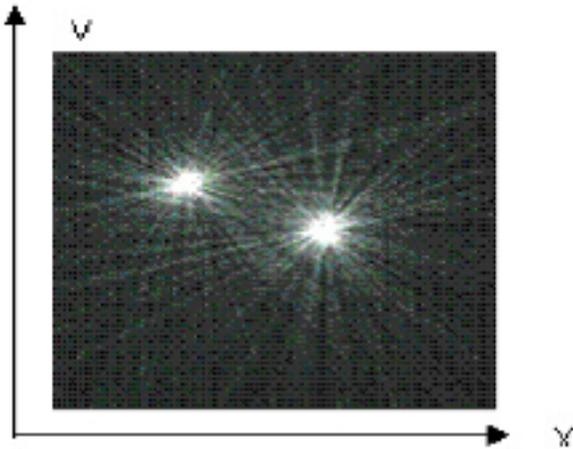


Figura 8: Reconstrucción por retroproyección de los puntos de la Figura 7

Este método produce artificios en forma de estrella, producto de las bajas frecuencias espaciales en dirección de la línea de proyección; para mejorar este aspecto se recurre a las técnicas de filtrado digital por transformada de Fourier en el plano, aplicando un filtro pasa altos de tipo rampa

Para simplificar el cálculo de la transformada de Fourier bidimensional, se recurre al teorema de la sección central de Fourier que expresa que la transformada en una dimensión de la función $f(x, \Phi)$, con $\Phi = \text{cte}$, es igual a la transformada en dos dimensiones de la imagen evaluada en la línea en que la proyección fue tomada.

Además, existen otros problemas derivados de la digitalización de las imágenes; por un lado el muestreo en el plano (s, Φ) es uniforme porque se toman imágenes a giros constantes $(\Delta\Phi)$ y con resolución constante (Δs) . Pero la versión discreta de la retroproyección (ecuación 3), en el plano (x, y) no tiene un muestreo homogéneo, ya que en el centro de la imagen hay una mayor densidad de líneas de proyección que en la periferia. Por otra parte lleva implícita una interpolación de los valores discretos de x e y , que tiene resolución variable según la zona de la imagen.

$$3- f(x, y) = 1/N \sum_{\phi=1}^N f[\phi, x \cdot \cos \phi + y \cdot \sin \phi]$$

Esto hace que la reproducción de las altas frecuencias en el centro de la imagen resulte mejor que en la periferia. Por eso se aplican filtros del tipo pasa banda, como los de Filtro Shepp-Logan o Hann (Farquhar y colaboradores, 1997). El algoritmo de retroproyección filtrada puede ser resumido en los siguientes pasos.

1. Se calcula la transformada de Fourier 1-D del primer ángulo ϕ del sinograma.
2. Se multiplica dicho resultado por la respuesta en frecuencia del filtro a aplicar.
3. Se realiza la transformada inversa de Fourier.
4. Se realiza la BackProjection como lo indica la Ec.3.
5. Se repite la operación para todos los ángulos Φ .

Actualmente existen otros enfoques para la reconstrucción de imágenes, basados en los denominados métodos iterativos, que modelan el proceso de recolección de datos e intentan, a través de iteraciones sucesivas, encontrar la imagen más consistente, desde el punto de vista estadístico, con los datos medidos. Estos últimos tienen una carga de procesamiento mucho mayor que los analíticos; su descripción está fuera del alcance de este trabajo (más detalles pueden encontrarse en Zeng, 2001).

Hasta aquí se ha descrito la formación de imágenes de atenuación a la transmisión de rayos X; en la próxima sección se discutirán las características de las imágenes de emisión que son características de la Medicina Nuclear.

Imágenes de Emisión

En la sección precedente se vio que las imágenes de RX proporcionan información sobre la densidad de los tejidos que atraviesan; son imágenes estructurales, pero informan muy poco acerca de la función de los órganos o del metabolismo celular. Si se une la fuente de radiación a moléculas que participen de alguna actividad metabólica específica, es posible obtener imágenes que informan sobre intensidad y distribución. Esta técnica de medicina nuclear dio origen a diversos aparatos para diagnóstico por imágenes; entre ellos se destaca la cámara gamma (CG) que produce imágenes planares, al igual que la RX, pero con ciertas diferencias distintivas:

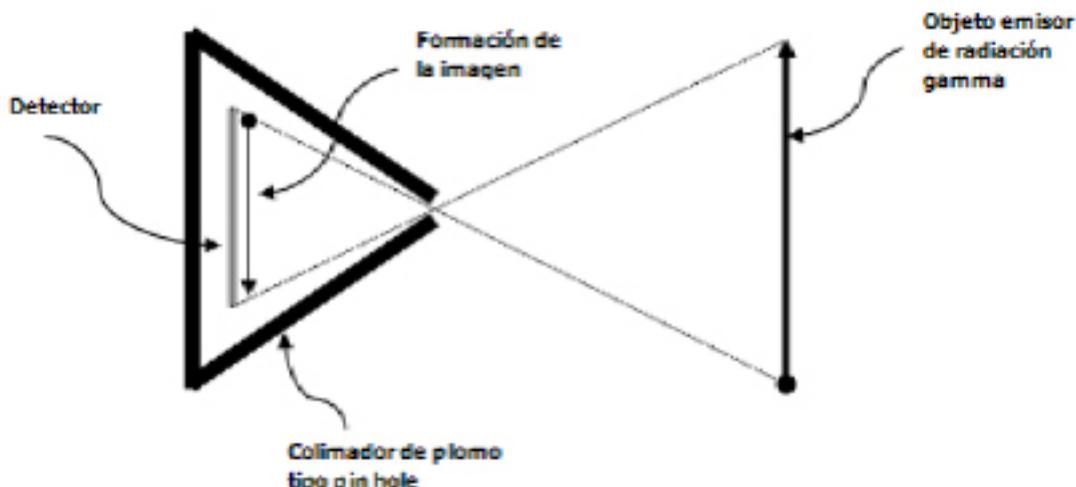


Figura 9. Formación de una imagen de emisión gamma con un colimador de plomo tipo pin hole

La radiación gamma proviene de todo el paciente y no de una fuente puntual; la situación es similar a la de la fotografía. Es necesario el empleo de un dispositivo que permita la formación de la imagen sobre el detector, pero en el caso de los rayos X no es posible utilizar lentes o espejos; se debe recurrir a la vieja técnica de la cámara oscura, interponiendo entre el objeto y el detector un colimador, construido de material opaco a la radiación (plomo en general), con uno o más orificios paralelos que dejan pasar la radiación en una única dirección, como se puede ver en la Fig. 9. Sólo una pequeña parte de la radiación emitida por el paciente llega al detector. Como la radiación gamma es más energética que los rayos X, la placa radiográfica es menos sensible a esta radiación y su empleo, aunque posible, es impracticable. Además existe una alta probabilidad de que los rayos gamma sean desviados y absorbidos en forma parcial (efecto Compton) al atravesar tanto al paciente como al colimador. Este efecto de dispersión produce una degradación en la calidad de la imagen, borroneando los bordes y causando pérdida de contraste. Por eso se debe recurrir a detectores más sofisticados.

Debido al trabajo de Hal Anger (Anger, 1952) en el año 1953 aparece el primer dispositivo para la generación de imágenes a partir de rayos gamma. En la Fig. 10 se puede ver el esquema de una cámara gamma. La formación de la imagen se realiza a partir de la detección de fotones gamma individuales, que al interactuar con el cristal de centelleo (el más usado es el yoduro de sodio activado con talio, NaI(Tl))

provocan la emisión de un destello de fotones visibles que son captados por un conjunto de fotomultiplicadores (PMT) en la cara opuesta del detector. La señal (pulsos) producida por los PMTs se procesa por dos circuitos diferentes:

a) El circuito de energía suma la señal de todos los PMTs para determinar si la energía Z recibida corresponde al pico de absorción total del radioisótopo administrado al paciente; de esta manera se descartan los fotones resultantes de un proceso de entrega parcial de su energía, desviados de su trayectoria original.

b) El circuito de posición realiza un proceso de "triangulación" que se obtiene como una suma ponderada de la señal de cada PMT de acuerdo a su posición (algoritmo de Anger) y permite determinar las coordenadas (X,Y) del destello en el plano del detector.

Para la formación de una imagen de emisión es necesario coleccionar un gran número de destellos ($\sim 10^6$); este hecho obliga a tiempos de exposición largos (varios minutos). La acumulación de destellos se puede realizar en forma analógica con un tubo de rayos catódicos (CRT) y una película fotográfica, o bien digitalizando (ADC) las señales X,Y,Z para incorporarlas a una PC.

En este caso las imágenes obtenidas corresponden a la distribución del radiotrazador en el tejido bajo estudio, pero como el nivel de gris de cada punto de la imagen obtenida es el resultado de la acumulación de un número reducido de destellos, aparecen efectos de ruido

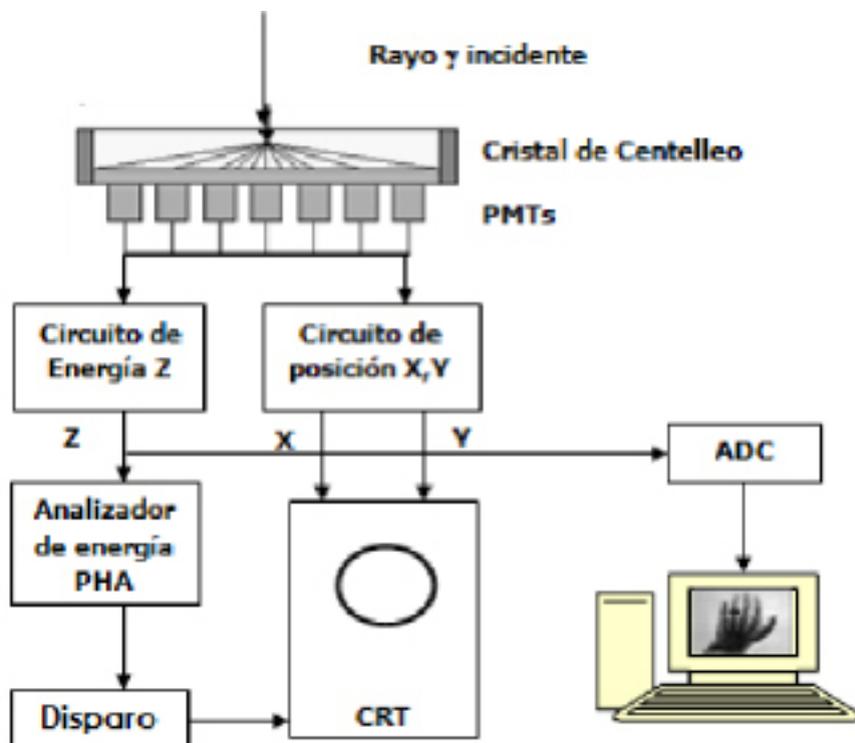


Figura 10: Esquema de una cámara gamma

estadístico, ya que la emisión de fotones obedece a un proceso estocástico de tipo Poisson.

Además, como todo el volumen del objeto se proyecta sobre el plano de la imagen (transformada de Radon), hace que sea difícil cuantificar las lesiones detectadas; por este motivo se las emplea para estudios de tipo cualitativo

Del mismo modo que en el caso de los RX, es posible obtener imágenes de CG en distintos ángulos alrededor del paciente y con procedimientos análogos a los realizados en el caso de la TAC se pueden reconstruir imágenes tridimensionales en cortes a distinta profundidad. Este tipo de tomas se llama SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography).

Tal tipo de estudios resuelve el problema de la superposición de muchos planos sobre una única imagen, pero por otra parte empeora el problema de ruido estadístico, ya que la escasa información colectada, debe repartirse en varios cortes. Para compensar este problema algunos equipos cuentan con más de un cabezal detector (Fig. 11).

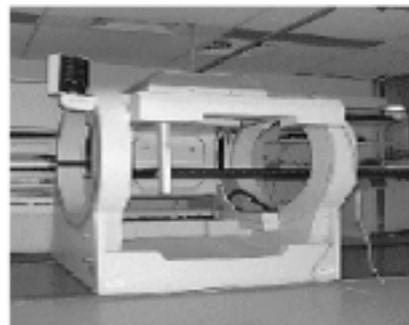


Figura 11: Cámara Gamma SPECT de doble cabezal

Tomografía por Emisión de Positrones

El colimador de plomo empleado tanto en la CG como en SPECT absorbe más del 80% de la radiación emitida por el paciente y es el responsable de la baja de sensibilidad que limita la capacidad de cuantificación. El aumento de sensibilidad está relacionado con la capacidad de diagnóstico de un cáncer antes que se produzca una lesión; además, la capacidad de cuantificación posibilita el seguimiento de un tratamiento observando la reducción de la actividad celular en la localización del tumor y se puede correlacionar con la efectividad de los tratamientos.

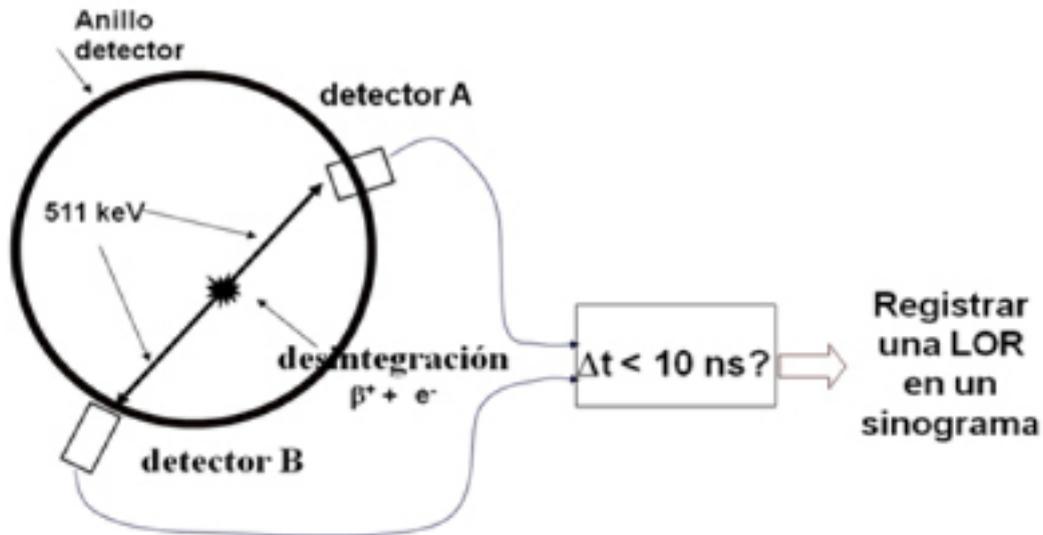


Fig. 12. Detección en coincidencia temporal de dos rayos gamma en oposición, que permite la colimación electrónica en equipos PET.

En estudios de corazón se pueden emplear técnicas diferenciales, observando zonas con poca actividad, o lesiones frías, como indicadores de células con irrigación insuficiente que pueden señalar muerte celular o isquemias. En combinación con estudios de perfusión miocárdica es posible determinar la viabilidad de una cirugía de revascularización.

El diagnóstico del mal de Alzheimer es más complicado; todavía no se han desarrollado drogas específicas y es necesario complementar los exámenes clínicos con las imágenes tomadas por tomografía de emisión de positrones (PET), cuyo principio se explicará a continuación, empleando FDG (flúordesoxiglucosa) y otras moléculas marcadas, como C-11 PiB (Pittsburgh Compound B marcado con 11C) que se asocian selectivamente a las proteínas Tau o amiloides, características de la enfermedad de Alzheimer. Se puede inferir del párrafo precedente que el aumento de la sensibilidad de los tomógrafos gamma tiene ventajas únicas. Para lograrlo se recurre a la particularidad de diversos átomos radiactivos que decaen emitiendo una emitiendo un positrón (β^+), que al unirse con los electrones del medio se aniquila emitiendo dos rayos gammas colineales y en oposición con una energía característica de 511 keV. Si se detectan ambos fotones gamma en coincidencia temporal es posible determinar una línea de respuesta (LOR) sin necesidad de interponer un colimador (la colimación es por

ventana temporal o electrónica). Éste es el fenómeno físico del cual toma ventaja la técnica de Tomografía de Emisión de Positrones (PET) logrando así una sensibilidad varias veces superior a la alcanzada por los equipos SPECT.

Para determinar las coordenadas espaciales de las LOR con eficiencia, se rodea al paciente con un anillo de detectores (Fig. 12). La mayoría de los tomógrafos tiene una forma cilíndrica o hexagonal. Además, cuanto mayor ancho tiene el detector en el sentido del eje de la camilla (sentido axial) mayor cantidad de cortes se podrán adquirir simultáneamente, de forma tal que los cortes superpuestos conformen un volumen en 3D.

Como el cuerpo del paciente emite fotones a una tasa elevada, existe una alta probabilidad de que se produzcan coincidencias de distinto tipo (Fig. 13). Las de tipo T (true) son las verdaderas coincidencias producto de los rayos directos de una única desintegración; las R (random) son coincidencias aleatorias de eventos distintos; en las S (scatter) al menos uno de los rayos fue desviado de su trayectoria; por último las de tipo M son una combinación de las anteriores, donde se detectan más dos coincidencias en una misma ventana temporal Δt .

Para evaluar el desempeño de un equipo y su habilidad para minimizar estos defectos en la detección se aplica una cifra de mérito, NEC

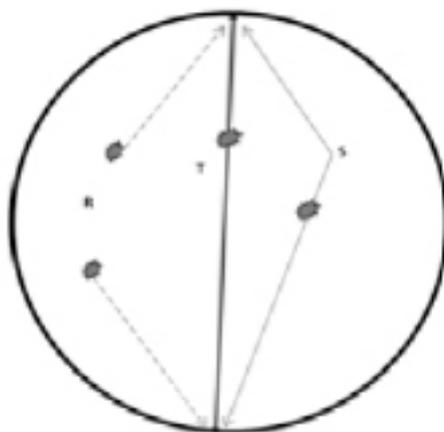


Fig. 13. Tipos de coincidencias: T, coincidencia Verdadera. S, coincidencia donde uno de los rayos X fue desviado por dispersión. R, coincidencia azarosa de eventos distintos

$$NEC = \frac{T^2}{T + S + R}$$

(Noise Equivalent Count rate) que evalúa la relación señal a ruido. Este índice se grafica en función de la actividad inyectada al paciente, para determinar la zona de trabajo en donde este indicador se hace máximo.

Para obtener un equipo de buen desempeño clínico se deberá contar entonces con detectores con muy buena resolución energética, que permitirán descartar los rayos desviados que pierden parte de su energía en el trayecto; una electrónica con muy buena resolución temporal para evitar tanto las coincidencias múltiples como las aleatorias y un tiempo muerto corto tanto en el detector como en la electrónica para sostener un buen ritmo de conteo.

Las alternativas existentes en la arquitectura de los PETs se diferencian básicamente por el tipo de cristales centelladores empleados: las que usan múltiples anillos de cristales pixelados (configuración 1) y las que usan detectores continuos en geometría hexagonal (configuración 2).

Configuración 1. Emplea la tecnología con cristales pixelados, consistente en un paquete de pequeños cristales detectores acoplados a PMTs que permiten individualizar los detectores en los cuales se produjo el destello. En general utiliza cristales de BGO (germanato de bismuto); aunque ya existen otros como puestos como el LSO (ortosilicato de lutecio) y el

Detector	BGO	NaI(Tl)	LSO	GSO	YLSO
Número de fotones luminosos a 511 keV	9000	<u>39000</u>	28000	10000	35000
Rendimiento relativo (Y)	9	<u>100</u>	75	30	90
dY/dT (%/°C)	-1.6	<u>0.08</u>	-.3	-.1	~-.3
Tiempo de decaimiento (nS)	300	<u>230</u>	55	40	~40
Resolución en energía (%)	15	<u>8</u>	12	8	~10%
Longitud de atenuación	11.6	<u>30.7</u>	12.3	15.0	~12
Costo (US\$/cc)	17	<u>7</u>	50	25	80 ¹
Densidad	7.13	<u>3.67</u>	7.4	6.71	7.1
Fosforescencia	baja	<u>alta</u>	baja	baja	baja
Higroscopicidad	No	<u>Si</u>	No	No	No

Tabla 1. Detectores de Centelleo comparados con el material de referencia Na(Tl) óptimo (subrayado), compensable con nuevos métodos (cursiva), irrelevante (gris). (Knoll 2000)

BGO: germanato de bismuto; NaI(Tl): yoduro de sodio activado con talio; LSO: ortosilicato de lutecio, GSO: ortosilicato de gadolinio, YLSO: ortosilicato de ytrio y lutecio.
¹ 10% Y

GSO (ortosilicato de gadolinio) ellos son hasta 10 veces más costosos.

Las cualidades salientes de estos cristales (Tabla 1) son su poder de frenado, su carácter no higroscópico y su facilidad de maquinado. Es por eso que se lo puede emplear en configuraciones pixeladas, pero como factores negativos se debe tener en cuenta su menor rendimiento lumínico y su costos elevados; por otra parte son muy difíciles de conseguir en el mercado.

Configuración 2. Emplea la tecnología de detectores continuos de ioduro de sodio activados con talio INa(Tl) (Saint Gobain Scintillators, 2008) en geometría hexagonal. Éste es el material de referencia en centelladores inorgánicos; tiene excelente rendimiento lumínico, muy buena resolución energética y bajo coeficiente de temperatura. Como desventaja principal se puede mencionar que es higroscópico y que su tiempo de decaimiento no es el mejor, aun cuando es tampoco el peor (230 nano segundos).

Criterios de diseño para el primer tomógrafo por emisión de positrones argentino (AR-PET)

En los países desarrollados existe un PET por cada millón de habitantes, mientras que en Argentina hay solamente cinco en todo el país, cuatro de ellos en Buenos Aires. El motivo fundamental de la inexistencia de equipos

PET es su alto costo y la falta de ciclotrones para producir el isótopo que se utiliza para hacer los estudios. La situación es desfavorable, no sólo por el costo de los equipos, importados en su totalidad, sino también por los problemas de mantenimiento, que muchas veces es ineficiente y depende de servicios que no se encuentran disponibles en el país, puesto que las empresas proveedoras se encuentran en Europa y Estados Unidos y ven el mercado latinoamericano como marginal.

Para satisfacer esta creciente demanda se propone el desarrollo de tecnología propia, con el propósito de proveer equipos que permitan aumentar la oferta de servicios de alta calidad en el diagnóstico por imágenes en instituciones oficiales. La disponibilidad de nuevos sistemas PET permitirá el acceso de mayor cantidad de pacientes a esta técnica tan importante, fundamentalmente para los pacientes oncológicos y también para los enfermos cardiológicos y neurológicos.

Las alternativas constructivas se diferencian básicamente en el costo de los cristales: se estima que el costo de un cabezal con cristales BGO y de LSO es tres y hasta diez veces más alto, respectivamente, que uno con cristales de NaI(Tl).

Por esta razón se seleccionó la alternativa 2 como la mejor con respecto a la relación costo-beneficio, puesto que la tecnología del NaI(Tl) es ampliamente conocida. Los proble

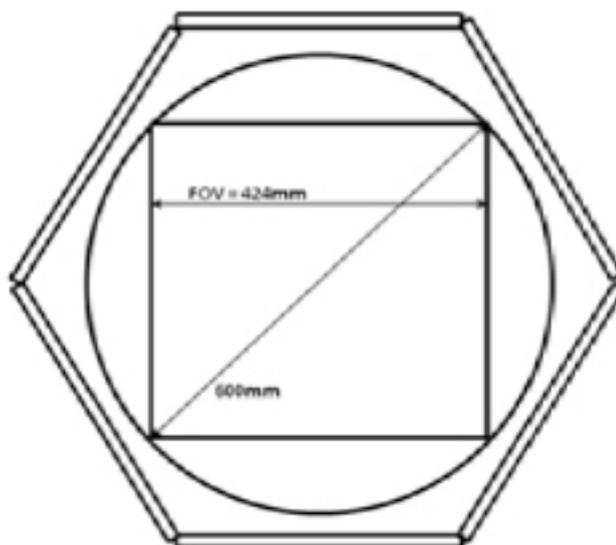


Fig. 13. Dimensiones del hexágono detector en relación con el campo de visión

mas de higroscopicidad se compensan con sellado hermético y los de fragilidad no son severos en PET, porque se usan cristales de espesores de alrededor de una pulgada. En cuanto al bajo poder de frenado, se compensa parcialmente con algoritmos de reconstrucción que hacen uso de modelos adecuados. Esto, sumado a cualidades salientes como eficiencia lumínica, excelente resolución en energía que permite la corrección de dispersión en adquisiciones 3D, bajo coeficiente térmico que reduce las demandas de estabilidad de la temperatura ambiente, bajo costo y existencia de muchas firmas proveedoras en el mercado internacional, hacen que sea la alternativa de elección.

Con el empleo de tecnología electrónica de arreglos lógicos programables (FPGA) y de algoritmos de reconstrucción iterativa de tipo Monte Carlo, que incluyen el modelado de la arquitectura y los fenómenos involucrados en la detección, se pueden lograr prestaciones competitivas a un costo de fabricación muy bajo comparado con equipos similares.

Consideraciones geométricas

La ventana de acceso al equipo debe ser lo suficientemente amplia como para admitir todo tipo de pacientes; por otro lado, por consideraciones tanto económicas como de resolución espacial, debe ser lo más pequeña posible. La solución de compromiso adoptada se muestra en la Fig. 13.

Se puede ver que el campo de visión (FOV) máximo es de 424mm, suficiente para la mayoría de los estudios. Es importante también contar con un FOV axial amplio (en el eje de paciente) de forma tal de que una exploración

de cuerpo entero, que son muy usuales en los estudios oncológicos, no lleve más de 5 posiciones de camilla. Por eso se seleccionó un ancho de detector de 300 mm. En los detectores continuos se pierde una fracción equivalente 1/2 PMT en cada borde, si se adoptan PMT de 50mm de lado el ancho del FOV en el sentido axial será de 250mm. La selección del espesor de cristal implica un compromiso entre la resolución espacial y la eficiencia de detección a 511 keV: un valor típico es 25 mm; con esta selección queda determinada la configuración del cabezal, como indica la Figura 14.

Se adoptan PMTs cuadrados de 51mm (Hamamatsu R1534) que tienen excelente rendimiento cuántico (25%) y baja dispersión en el tiempo de tránsito (5 ns), fundamental para determinar coincidencia temporal.

Sistema de coordenadas

Dadas las coordenadas de los destellos en cada uno de los cristales (X1,Y1), (X2,Y2) calculadas con el algoritmo Anger, se podrán calcular las LORs de acuerdo a las siguientes relaciones (Fig. 15):

$$\phi = \arctan\left(\frac{Y1 - Y2}{X1 - X2}\right) + \frac{\pi}{2}, \text{ teniendo en cuenta}$$

$$\text{que } -\frac{\pi}{2} \leq \arctan(\phi) \leq \frac{\pi}{2}.$$

De esta forma, el ángulo Φ toma valores en el rango de $0 \leq \phi < \pi$.

Para calcular el punto (Xr,Yr) debemos encontrar la intersección de la recta correspondiente a la LOR, y la recta perpendicular a la LOR



Fig. 14. Configuración del detector, cristal de INa(Tl) de 300x400x25mm³ con un arreglo de 6x8 fotomultiplicadores cuadrados de 50mm

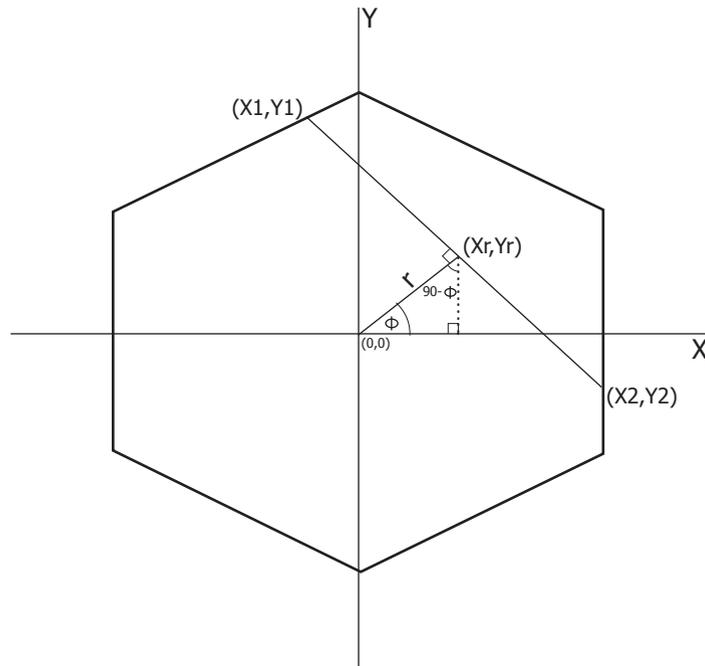


Figura 15: Sistema de coordenadas

que pasa por el origen:

$$\begin{cases} y = \frac{-1}{\tan \phi} (x - X1) + Y1 \\ y = \tan(\phi)x \end{cases} \Rightarrow Xr \cdot \tan \phi = \frac{-1}{\tan \phi} (Xr - X1) + Y1 \Rightarrow Xr = \frac{X1 + Y1 \cdot \tan \phi}{\tan^2(\phi) + 1}$$

$$Yr = \tan(\phi) \cdot Xr$$

Con el punto (Xr, Yr) ya calculado, se puede obtener el valor de r como:

$$r = \sqrt{Xr^2 + Yr^2}$$

Cantidad de Proyecciones Necesarias

Para generar un sinograma se debe hacer discretas las variables Φ y r . La cantidad de proyecciones (ángulos distintos) y de LORs por ángulo (cantidad de valores de r), deberá cumplir con el teorema de Nyquist. Por lo tanto, el muestreo espacial debe ser como mínimo dos veces menor que la resolución espacial Δr sobre cada cabezal.

$$\Delta r \leq \frac{\text{resoluciónEspacial}}{2}$$

Como en la reconstrucción de un punto en una

imagen PET es el producto de un número muy grande de LORs, el perfil de cuentas responde a una forma gaussiana; es por eso que la resolución se evalúa como el ancho a mitad de altura (FWHM).

La LOR con mayor valor de r será aquella en la que el punto (Xr, Yr) correspondiente a la misma se encuentra en la diagonal de FOV. Por lo tanto, la resolución angular necesaria para una diagonal D del FOV es

$$\Delta \phi \leq \frac{2\Delta r}{D}$$

Para una resolución espacial (FWHM) de 5mm, teniendo en cuenta que el muestreo deberá ser al menos la mitad de la resolución buscada, se adopta la tercera parte

$$\Delta r = \frac{FWHM}{3} = 1,66\text{mm}$$

Con esta resolución, el número de valores para r es

$$N_r = \frac{D}{\Delta r} = \frac{600\text{mm}}{1,66\text{mm}} = 362$$

9 bits serán suficientes para el eje r de los sinogramas. En cambio, para $\Delta\Phi$

$$\Delta\phi \leq \frac{2\Delta r}{D} = 2,166/600 = 0,3^\circ$$

El número de proyecciones o de valores de Φ es

$$N_\phi = \frac{\pi D}{2, \Delta\phi} = \frac{\pi \cdot 600\text{mm}}{2 \cdot 2,166\text{mm}} = 568$$

Se adopta también un valor de 9 bits para el eje Φ , con una pequeña degradación en la resolución.

Discusión

Teniendo en cuenta las consideraciones precedentes, para lograr un equipo con buenas prestaciones, éste deberá ser totalmente digital, de forma tal que se puedan aplicar técnicas de procesamiento digital para superar las limitaciones inherentes a los detectores continuos de NaI(Tl). En la arquitectura adoptada para el tomógrafo AR-PET (Fig. 16), el procesamiento está distribuido en cuatro capas. En cada nivel

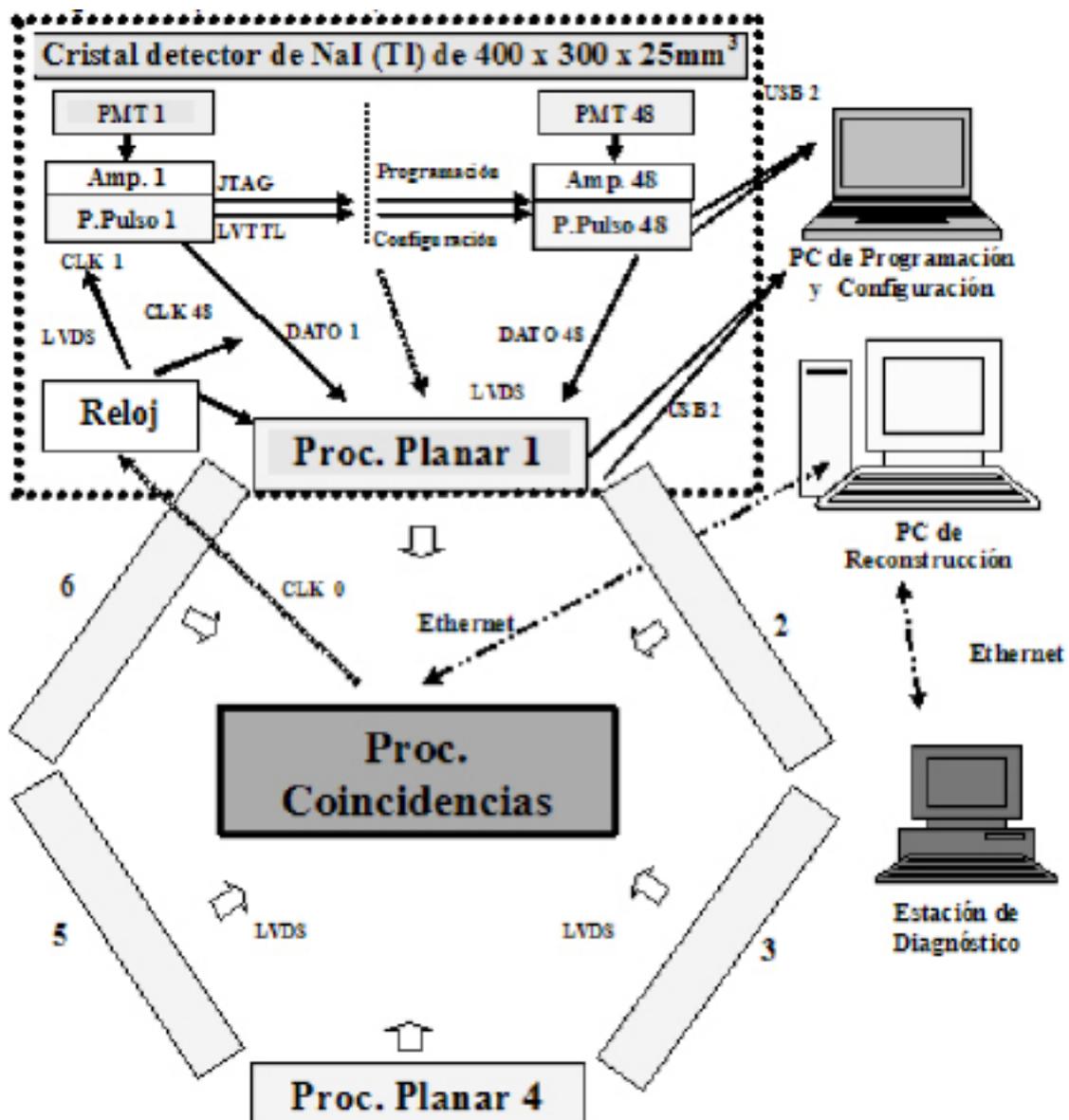


Fig. 16. Diagrama en bloques del sistema de adquisición y procesamiento

se realizan las operaciones necesarias para transmitir al nivel superior sólo la información relevante; de esta manera se pueden lograr tasas de adquisición del orden $1,2 \cdot 10^7$ pps (pulsos por segundo).

La primera capa es el Procesador de Pulsos luminosos (PPul) que realiza las tareas de amplificación, control de ganancia y digitalización de la señal del PMT. El PPul esta formado por 4 placas apiladas en la base de cada PMT que trasmite los valores de energía y marca temporal hacia el procesador planar por medio de un bus sincrónico a 40 Mbs (megabits por segundo).

La segunda capa es el procesador planar (PPla) que realiza cálculos de centroide individualizando al PMTs que recibió más EP que sus vecinos para formar un cluster de 3×3 PMTs, centrado en el máximo EP; con esta información se realiza la localización planar (X_p, Y_p). El PPla puede procesar hasta tres destellos simultáneamente.

Los datos X_p, Y_p, D_p y TSp se ordenan por la marca temporal y se envían al procesador de coincidencias por medio de un bus serie (BCoin) también tipo LVDS @40MBps.

La tercera capa es el Procesador de Coincidencias (PCoin) que recibe la señal de los seis detectores por medio del BCoin y computa la posición de las LORs en coordenadas espaciales absolutas, sobre la base de la localización relativa de los PPla y a las referencias absolutas de giro del pórtico y avance de la camilla (Liu y colaboradores, 1999).

La cuarta capa está localizada fuera del tomógrafo, en una PC con placa de video tipo CUDA (Compute Unified Device Architecture) que permite la programación en lenguaje C de los algoritmos de reconstrucción de tipo Montecarlo en la placa de video que tiene hasta 240 procesadores en paralelo. Las capas se comunican por medio de buses específicos para la transferencia de datos y para la configuración de cada una de las capas:

El Bus de Datos (BD) LVDS de 40Mbs serie sincrónico se usa para la transferencia de los datos de energía y marca temporal de los destellos hacia el PPla. Los 48 PPul acceden al PPla en paralelo.

El Bus de Configuración (BC) LVTTTL de 1Mbs serie es empleado para la configuración, la calibración de la ganancia, el ajuste de cero, el envío de datos del MCA y el diagnóstico de fallas. Los 48 PPul de cada CD acceden a la PC de configuración por un único puerto USB.

El Bus de Programación (BP) JTAG se emplea en la programación de la FPGA de los 48 PPul, la PC de configuración los accede por un único puerto USB. En la Figura 17 se puede ver un cabezal completo donde se distinguen las distintas capas de procesamiento.

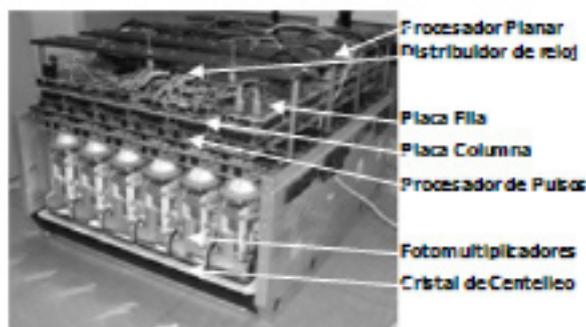


Figura 17: Cabezal detector sin cubierta, donde se pueden ver las capas de procesamiento.

Los seis cabezales están soportados por una estructura mecánica, el pórtico (gantry) de configuración hexagonal (Fig. 18), tiene capacidad de rotación continua de 1 rpm sincronizado con el avance de la camilla a 30mm por minuto, para uniformar los efectos de ganancia espacial y para adquisiciones en forma helicoidal. Está diseñado en forma modular para facilitar su instalación y su transporte; sus dimensiones y peso permiten el uso de ascensores y puertas de tamaño estándar. Para reducir los requerimientos ambientales, posee un sistema de ventilación de circuito cerrado conectado a un intercambiador de calor. El sistema de alimentación provee una única tensión de 12 Vcc por medio de un anillo colector; puede trabajar con baterías. La transferencia de datos se realiza en forma inalámbrica.

Conclusiones

Con la arquitectura descrita en los párrafos precedentes se espera contar con un equipo de prestaciones similares a los más avanzados que están actualmente en operación, pero a una fracción del precio de mercado. Esto es posible gracias al uso de cristales de centelleo de bajo costo y haciendo énfasis en la utilización de las

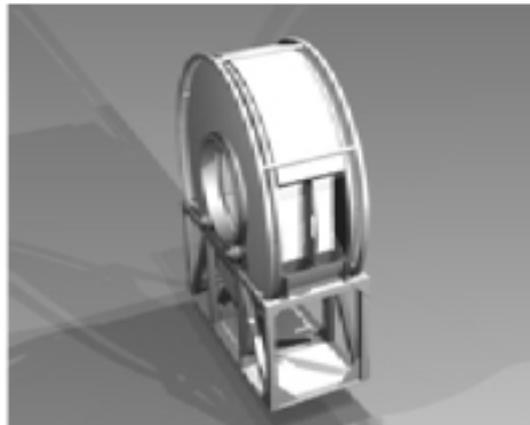
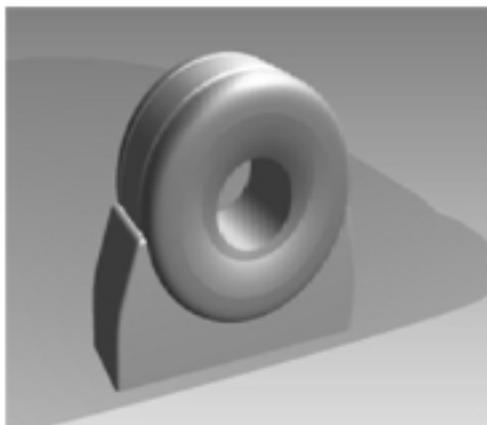


Fig. 18. Diseño Mecánico. a) aspecto exterior; b) sin cubierta.

más recientes técnicas de procesamiento de las señales. En la actualidad se encuentran contruidos dos cabezales completos con los que se realizaron pruebas de calibración de energía y se desarrolló un método novedoso (Venialgo y colaboradores, 2008) obteniendo una resolución (FWHM) de 8,6% para una fuente de ^{137}Cs . En las pruebas de uniformidad se obtuvo un resultado de 15% antes de la normalización. Se efectuaron pruebas de linealidad con

una fuerte colimada. Además se realizaron pruebas de adquisición en coincidencia con una ventana temporal y se completó el diseño del pórtico de primer prototipo de tomógrafo por emisión de positrones diseñado totalmente en el país. Las pruebas preliminares de adquisición en coincidencia dieron resultados alentadores en cuanto a resolución de energía, resolución espacial y eficiencia en la detección.

Referencias

- ANGER, H. O. (1952) *Use of gamma-ray pin-hole camera for in-vivo studies*. Nature 170, 200.
- BRUYANT, P. (2002) Analytic and Iterative Reconstruction Algorithms in SPECT. J. Nucl. Medicine 43 (10) 1343.
- DEANS, S. R. (1983). *The Radon Transform and Some of Its Applications*. John Wiley & Sons, New York.
- FARQUHAR, T. H.; CHATZIOANNOU, A.; CHINN, G.; DAHLBOM, M.; HOFFMAN, E. J. (1997) *An investigation of filter choice for filtered back-projection reconstruction in PET*. Nuclear Science Symposium, IEEE Volume 2, pp. 1042 – 1046.
- HOUNSFIELD, G. N. (1973) *Computerized transverse axial scanning (tomography)*. British Journal of Radiology 4, 1016.
- KEPLER J. (1604) *Tratado Ad Vitellionem Paralipomena. Ad Vitellionem paralipomena, quibus astronomiae pars optica traditur*. Francfurt, Claude de Marne.
- KNOLL, G. F. (2000) *Radiation Detection and Measurements, 3rd edition*. John Wiley & Sons, Inc.
- LIU, X. ; DEFRISE, M.; MICHEL, C.; SIBOMANA, M.; COMTAT, C.; KINAHAN, P.; TOWNSEND, D. (1999) *Exact Rebinning Methods for Three-Dimensional PET*. IEEE Transactions on Medical Imaging 18 (8) 657.
- SAINT GOBAIN SCINTILLATORS (2008) www.detectors.saint-gobain.com (última consulta: octubre de 2008)
- VENIALGO, E.; ESTRYK, D.; MARINSEK, S.; VERRASTRO, C. (2008) *Método de Calibración de Energía para Cámara Gamma y PET con Cristales Continuos*. XVI Congreso Argentino de Biología Molecular. Buenos Aires, 31 de octubre al 2 de noviembre.
- ZENG G. (2001) *Image - reconstrucción – a tutorial*. Computerized Medical Imaging and Graphics 25 (29) 9.

Estudio sobre la factibilidad de empleo del análisis por activación neutrónica en cerámicos arqueológicos enteros

– Parte 1: Aspectos de precisión de resultados y de seguridad radiológica del proceso

Patricia Bedregal¹, Marco Munive¹, Patricia Mendoza¹, Angel Revilla¹ Javier Gago¹, Isaac M. Cohen²⁻³ Eduardo Montoya¹

¹ Departamento de Química, Instituto Peruano de Energía Nuclear.
Av. San Juan de Dios s/n, Carabayllo, Lima
pbedregal@ipen.gob.pe

² Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires,
Departamento de Ingeniería Química. Avenida Medrano 951 (C1179AAQ),
Buenos Aires, Argentina

³ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Avellaneda, Secretaría de Ciencia,
Tecnología e Innovación Productiva. Av. Mitre 750 (1870) Avellaneda, Buenos Aires, Argentina

Recibido el 9 de enero de 2009; aceptado el 4 de marzo de 2009.

Resumen

Se ha estudiado la factibilidad de utilización del análisis por activación neutrónica instrumental de objetos cerámicos enteros, empleando flujos neutrónicos térmicos bajos. El estudio toma en cuenta los elementos químicos relevantes para las investigaciones arqueológicas, así como el grado de exactitud requerido. Se demuestra que después de una irradiación de un objeto cerámico típico con una masa del orden de 1 kg durante 45 minutos, a un flujo neutrónico térmico del orden de 10^9 n.cm⁻².s⁻¹, se obtienen, por espectrometría gamma, señales analíticas con estadísticas de medición mejores que 1%, para ⁷⁶As, ¹³¹Ba, ¹⁴¹Ce, ⁶⁰Co, ¹³⁴Cs, ¹⁸¹Hf, ¹⁴⁰La, ²⁴Na, ¹²²Sb, ⁴⁶Sc, ¹⁵³Sm y ²³³Pa, mientras que ⁵¹Cr, ¹⁵²Eu, ⁴²K, ⁸⁶Rb, ¹⁷⁵Yb y ⁶⁵Zn pueden ser detectados con estadísticas de medición del orden de 1% a 2%. Por otro lado, las estadísticas de medición para ¹⁷⁷Lu, ¹⁴⁷Nd, ²³⁹Np, ¹⁶⁰Tb y ¹⁸¹Ta son relativamente pobres, con órdenes entre 3% y 10%. Se discute la posibilidad de realización de determinaciones cuantitativas confiables, teniendo en cuenta la complejidad del análisis de los objetos cerámicos enteros, que involucra factores tales como masas relativamente altas, al igual que formas asimétricas y variables.

PALABRAS CLAVE: ANÁLISIS POR ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA, CERÁMICOS ARQUEOLÓGICOS, MUESTRAS GRANDES

Abstract

The feasibility of the instrumental neutron activation analysis of entire pieces of archaeological pottery, using low thermal neutron fluxes, is examined. The study takes in account the chemical elements relevant for archaeological investigations, as well as the degree of accuracy required for such kind of research. It is shown that after irradiation of a typical pottery sample of about 1 kg for 45 minutes, at a thermal flux of about 10^9 n.cm⁻².s⁻¹, analytical signals are obtained, by gamma spectrometry, with counting statistics better than 1%, for ⁷⁶As, ¹³¹Ba, ¹⁴¹Ce, ⁶⁰Co, ¹³⁴Cs, ¹⁸¹Hf, ¹⁴⁰La, ²⁴Na, ¹²²Sb, ⁴⁶Sc, ¹⁵³Sm y ²³³Pa, mientras que ⁵¹Cr, ¹⁵²Eu, ⁴²K, ⁸⁶Rb, ¹⁷⁵Yb y ⁶⁵Zn whereas ⁵¹Cr, ¹⁵²Eu, ⁴²K, ⁸⁶Rb, ¹⁷⁵Yb y ⁶⁵Zn can be detected with counting statistics within 1% and 2%. On the other hand, the statistics of measurement are relatively poor (orders of 3% - 10%) for ¹⁷⁷Lu, ¹⁴⁷Nd, ²³⁹Np, ¹⁶⁰Tb y ¹⁸¹Ta. The feasibility of accomplishment of reliable quantitative determinations, taking in account the complexity of the analysis of entire pieces of archaeological pottery is discussed, which involves factors such as high masses, as well as asymmetric and variable shapes.

KEYWORDS: NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS, ARCHAEOLOGICAL CERAMICS, LARGE SAMPLES

Introducción

El análisis por activación neutrónica instrumental (INAA) se ha venido utilizando desde 1957 para la caracterización química elemental cuantitativa de cerámicos arqueológicos, con la finalidad de establecer su procedencia (Sayre y Dodson, 1957; Sayre y colaboradores, 1958; Bishop y Neff, 1989; Bishop, 1999; Glascock y NET, 2003).

La forma tradicional de efectuar el análisis consiste en extraer pequeñas porciones del cerámico arqueológico o del fragmento de interés, operación que causa un cierto grado de deterioro de los objetos bajo estudio, y por cuya razón a menudo no es permitida por los arqueólogos y los profesionales encargados de la conservación de los especímenes. Se origina, en consecuencia, un conflicto entre la necesidad real de conocer la composición química elemental de los objetos cerámicos y el requerimiento de preservar su integridad. La obvia respuesta a esta aparente contradicción es que es preciso desarrollar técnicas no destructivas de determinación, donde la noción de muestreo debe ser reemplazada por la concepción de que la muestra en proceso de análisis es la pieza en sí misma.

El análisis por activación neutrónica de muestras grandes (Bode y colaboradores, 1997; Overwater y colaboradores, 1996; Lin y Henkelman, 2002), ofrece una alternativa potencial para las determinaciones multielementales en cerámicos arqueológicos enteros. No obstante, es una técnica que se encuentra aún en fase de desarrollo y en la que deben solucionarse problemas tanto operativos como de cálculo. Entre los factores que representan inconvenientes o inclusive imposibilitan los procesos de análisis de muestras de tamaño considerable se encuentran:

- Dificultad en disponer de una posición adecuada de irradiación
- Generación de altas actividades, con el consiguiente problema de seguridad radiológica, si las posiciones de irradiación se encuentran en el núcleo o son cercanas a él.
- Distribución irregular del flujo neutrónico, no sólo en razón de las variaciones axiales y radiales, sino también por el efecto de auto-depresión que generan los componentes mayores de las muestras.

- Dificultad en definir una curva adecuada de eficiencia del detector (cambiante prácticamente de objeto a objeto) donde la autoabsorción de la radiación gamma es un componente de complicación adicional. Los dos factores mencionados en último término representan problemas serios en la consecución de resultados precisos y confiables, respuesta última que debe asegurarse para hacer viable la aplicación de los datos en estudios arqueológicos de procedencia.

Los enfoques tradicionales para su resolución se basan en el desarrollo de factores de corrección muy complejos. En este caso el cuestionamiento no surge de la obtención del dato, puesto que las computadoras actuales permiten la realización de las operaciones matemáticas sin implicar tiempos largos de procesamiento, sino de su validez. Se trata de factores cuya dimensión puede ser cercana al valor numérico del dato original a ser corregido, o incluso superior, y donde no existe forma alguna de asegurar su confiabilidad (Obviamente, no existe un material certificado o un patrón de comparación que pueda actuar de referencia para asegurar la calidad del análisis)

El presente trabajo ha sido realizado como parte de las actividades previstas en el Contrato de Investigación 15224, celebrado con el Organismo Internacional de Energía Atómica, el que está destinado al desarrollo de métodos de análisis por activación de objetos arqueológicos enteros. Se describen los pasos de la exploración preliminar de la factibilidad, bajo concepciones diferentes a las hasta aquí desarrolladas en otros laboratorios; la propuesta consiste en la irradiación, en un dispositivo rotatorio, a un flujo neutrónico bajo (109 n.cm⁻².s⁻¹ o menor) y la estandarización mediante réplicas comerciales de las piezas originales. Es posible así formular una nueva metodología de análisis.

Parte Experimental

Tratamiento inicial

El objeto cerámico que se empleó para las experiencias es una réplica de una famosa cerámica de estilo Mochica, adquirida en un mercado local de artesanía (ver figura 1) con una masa de 783 gramos. Con el objeto de averiguar su composición en componentes mayores y traza se extrajeron, empleando una broca de carburo de tungsteno, pequeñas muestras parciales, en forma de polvo, de diversas partes de este objeto, hasta obtener una muestra global del orden de 350 mg, que se dividió en dos fracciones de 154 y 165 mg.

Ambas submuestras se analizaron mediante la técnica de activación neutrónica, según el método del k0 (De Corte, 1987; De Corte y Simonits, 2003). Con propósitos de control de calidad analítica se analizó también una muestra del material de referencia Ohio Red Clay (Kuleff y Djingova, 1998). Las condiciones de irradiación y medición empleadas han sido descritas en otros trabajos realizados en el Departamento de Química del Instituto Peruano de Energía Nuclear (Bedregal, 2002).

Irradiación

El objeto cerámico se irradió a la salida de uno de los tubos radiales del reactor nuclear de 10 MW del Centro Nuclear RACSO (Instituto Peruano de Energía Nuclear) con un flujo de neutrones térmicos de $1,3 \times 10^9 \text{ n.cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, durante 45 min, empleando un dispositivo rotatorio (ver figura 2) con una velocidad de 0,2 rpm.

El sentido del dispositivo, cuyo diseño se efectuó para este trabajo, es asegurar que en condiciones de operación rutinaria, muestra y estándar reciban el mismo flujo integrado.

Después de tiempos de decaimiento de 5 y 10 días, se realizaron las mediciones por espectrometría gamma de alta resolución empleando un detector de Ge intrínseco, ORTEC GEM70P4, de 70% de eficiencia relativa y con una relación pico / Compton de 70 para la energía de 1332,5 keV. Los tiempos de medición fueron de 21600 y 100000 segundos, respectivamente.

Los espectros gamma se procesaron empleando el programa GENIE 2000 de CANBERRA.



Figura 1. Fotografía del objeto cerámico en estudio.



Figura 2. Dispositivo rotatorio de irradiación. Se muestra una parte del objeto cerámico en estudio.

Elemento	Nucleido	Período (días)	t _{decaimiento} (días)	Energía gamma (keV)
Antimonio	Sb-122	2,724	5	564
Arsénico	As-76	1,09	5	559
Bario	Ba-131	11,5	10	216; 373; 496
Cerio	Ce-141	32,51	10	145
Cobalto	Co-60	1925,3	10	1173; 1332
Cromo	Cr-51	27,7	10	320
Cesio	Cs-134	755,0	10	569; 604; 796
Escandio	Sc-46	83,83	10	889; 1121
Europio	Eu-152	4950,2	10	1408
Hafnio	Hf-181	42,39	10	482
Hierro	Fe-59	44,5	10	1099; 1291
Lantano	La-140	1,678	5	328; 487; 1596
Lutecio	Lu-177	6,73	5	113; 208
Neodimio	Nd-147	10,98	10	531
Potasio	K-42	0,515	5	1525
Rubidio	Rb-86	18,63	10	1076
Samario	Sm-153	1,938	5	103
Sodio	Na-24	0,626	5	1369
Tantalio	Ta-182	114,4	10	1221
Terbio	Tb-160	72,3	10	879
Torio	Pa-233	26,97	10	312
Uranio	Np-239	2,357	5	106; 277
Yterbio	Yb-175	4,185	5	396
Zinc	Zn-65	244,3	10	1115

Tabla 1. Elementos y nucleidos detectados

Resultados y Discusión

Los nucleidos detectados para cada elemento y sus características relevantes se muestran en la Tabla 1. En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en el análisis por duplicado del objeto cerámico en estudio para los 24 elementos detectados. Se indica también el coeficiente de variación, desviación porcentual de cada resultado con respecto al promedio, calculado como la diferencia entre los resultados, dividida por dos veces el promedio y multiplicada por 100.

Cromo, lutecio, neodimio, tantalio, uranio y zinc presentan coeficientes de variación mayores que 10 %, debido a una estadística pobre de las señales analíticas obtenidas a partir del análisis por activación neutrónica instrumental de las muestras en polvo. Por la misma razón

otros dos elementos, europio y terbio, registran coeficientes de variación con órdenes de 7 % y 5 %, respectivamente. Los resultados de los otros 16 elementos analizados muestran una precisión que se suele aceptar como satisfactoria para muchos propósitos analíticos. En el caso del presente trabajo, interesa contrastar los resultados presentados en la tabla 2 con la lista de elementos de interés para investigaciones arqueológicas y con el grado de exactitud (que incluye los conceptos de precisión y veracidad) requerido para tales investigaciones.

Elemento	Resultados (mg . kg ⁻¹)		
	Réplica 1	Réplica 2	Coefficiente de variación
Antimonio	3,28	3,26	0,30
Arsénico	30	32	3,2
Bario	4380	4420	0,45
Cerio	76	77	0,65
Cobalto	22	21	2,3
Cromo	33	25	14
Cesio	24	26	4,0
Escandio	11,34	11,29	0,44
Europio	1,3	1,5	7,1
Hafnio	9,0	9,2	1,1
Hierro	33700	33600	1,5
Lantano	37	36	1,4
Lutecio	0,3	0,5	25
Neodimio	17	39	39
Potasio	28400	27000	1,1
Rubidio	126	128	0,79
Samario	5,4	5,2	1,9
Sodio	17450	17420	0,086
Tantalio	1	0,8	11
Terbio	1	0,9	5,3
Torio	17,6	17,1	1,4
Uranio	3	6	33
Yterbio	2,2	2,1	2,3
Zinc	85	130	21

Tabla 2. Composición del objeto cerámico estudiado.

En general, la elección de los elementos a ser determinados varía para cada problema arqueológico específico. Como principio general, son de importancia aquellos elementos que tienen una marcada diferenciación geoquímica durante el proceso de cristalización de las rocas ígneas, cuya meteorización dio origen a las arcillas luego empleadas en la manufactura de objetos cerámicos. Ellos se concentran en la fracción fina de la arcilla (0.25 μm – 1 μm) en niveles del orden de 102 mg.kg⁻¹. Entre los elementos importantes se encuentran el cromo, el torio, el escandio y los lantánidos (Bishop y colaboradores, 2003), que por su inmovilidad geoquímica proporcionan la base primaria para la conformación de patrones de comportamiento en estudios de procedencia, al establecer las mayores fuentes de variabilidad química entre cerámicos de dis-

tinta procedencia, aun si ellas son de época y estilo análogos. Así, tales elementos se constituyen en una especie de "huella digital".

Estos elementos experimentan procesos de concentración causados por los factores climáticos que dan lugar a la formación de los lechos de arcilla; debido a esto, sus concentraciones resultantes determinan las diferencias encontradas en las distintas arcillas, que se traslada a la composición de los objetos cerámicos fabricados a partir las mismas (Bishop y colaboradores, 2003). Siguiendo la misma referencia, también son importantes los elementos alcalinos y alcalinotérreos (Na, K, Rb, Cs, Mg, Ca, Sr, Ba), que están presentes en los feldspatos, constituyentes de los minerales más abundantes en la corteza terrestre.

Finalmente (Bishop y colaboradores, 2003) los metales de transición (Mn, Fe, Co, etc.) se encuentran en mayores proporciones en los sedimentos oxidados y podrían revelar la presencia de inclusiones de óxidos metálicos en la pasta cerámica.

El párrafo anterior sugiere una lista general de los elementos cuyas concentraciones deberían ser determinadas de manera prioritaria: alcalinos, alcalinotérreos, elementos de transición y lantánidos. Esta lista tiene que ser conciliada con los elementos que se pueden determinar mediante análisis por activación neutrónica instrumental en muestras de cerámica, que no incluye, por ejemplo, a todos los lantánidos ni a todos los elementos de transición. Por otra parte, no sería conveniente descartar a priori a algunos elementos, tales como aluminio, galio, arsénico y antimonio, que aunque no pertenecen a ninguna de estas categorías son determinables mediante análisis por activación neutrónica instrumental.

Adicionalmente, se deben determinar las concentraciones de los elementos importantes con un grado de exactitud suficiente para el propósito de establecer la procedencia de los cerámicos arqueológicos analizados (Bishop y colaboradores, 1990; Bishop y Blackman, 2002; Bishop, 2003). Siguiendo a Bishop (2003), se requiere que varios de los elementos sean determinados "con errores analíticos menores que 5%", si se tienen que resolver preguntas comunes sobre la producción de la cerámica arqueológica a un nivel intra-regional, mientras que para problemas a nivel interregional se pueden tolerar errores analíticos algo mayores. De hecho, cuantos más elementos se puedan determinar "con errores analíticos menores a 5%" y cuanto menores sean dichos errores, mejor se podrá diferenciar la procedencia de cerámicos pertenecientes a regiones geográficas cercanas.

La precisión con la que se puedan medir las señales analíticas de espectrometría gamma dependerá de los factores siguientes:

- La masa de la muestra a ser analizada, que determinará la activación inducida en la muestra. En el caso de objetos cerámicos enteros es importante tener en cuenta el grado de auto-depresión del flujo neutrónico durante la etapa de irradiación.

- Las concentraciones de los diversos elementos presentes en el objeto cerámico.
- La forma y el tamaño de la muestra (que determinará la eficiencia de medición).
- El flujo neutrónico disponible en la facilidad de irradiación (en este caso, entre aproximadamente $2,5 \times 10^6$ y $1,5 \times 10^9$ n.cm⁻².s⁻¹) así como el tiempo de irradiación. Se necesita obtener una buena estadística de medición para cada una de las señales de interés, pero por otra parte se debe asegurar, en forma simultánea, que el objeto cerámico analizado pueda volver a ser manipulado sin riesgo radiológico para los arqueólogos, un tiempo razonable después de la irradiación.

Los dos primeros factores mencionados requieren una discusión adicional, de carácter conjunto. En efecto, los datos de la Tabla 1 se refieren a un objeto cerámico fabricado en la época actual, que posee una masa del orden de 800 g y una composición química específica. Para poder establecer la factibilidad del análisis por activación neutrónica instrumental de objetos cerámicos enteros, se deben examinar los rangos de variación de las masas de las muestras de cerámicas arqueológicas y de las concentraciones de los elementos químicos presentes en ellas.

Existe un número importante de objetos cerámicos enteros de dimensiones tan grandes como la estatura de una persona, y por lo tanto con masas del orden de decenas de kilogramos; se considera aquí que el análisis de tales objetos enteros plantea un problema de solución muy difícil y costosa. En consecuencia, de manera arbitraria se ha fijado en el presente proyecto un rango de masas entre aproximadamente 400 g y 2 kg. Hecho esto, el tamaño debería quedar simultáneamente fijado en una escala manejable. Las primeras tres columnas de la tabla 3 contienen una evaluación experimental preliminar de los rangos de concentración de los elementos presentes en un objeto cerámico arqueológico típico. Los datos se han tomado de los registros del laboratorio de los autores y corresponden a unas 600 muestras de cerámicas peruanas precolombinas, pertenecientes a diversas culturas y localidades separadas por varios cientos de kilómetros. La cuarta columna contiene valores redondeados de las concentraciones de los elementos encontrados en el objeto cerámico estudiado en el presente trabajo. Una comparación directa

Elemento	Máximo (mg . kg ⁻¹)	Mínimo (mg . kg ⁻¹)	Encontrado (mg . kg ⁻¹)	Señal Obtenida (cuentas)	Precisión (%)
As	1,3 x 10 ²	1	3,1 x 10 ¹	9,8 x 10 ⁴	0,4
Ba	4,5 x 10 ³	4,0 x 10 ²	4,4 x 10 ³	1,4 x 10 ⁵	0,4
Ce	2,8 x 10 ²	2,5 x 10 ¹	7,6 x 10 ¹	7,5 x 10 ⁴	0,6
Co	5,0 x 10 ¹	5	2,2 x 10 ¹	2,8 x 10 ⁴	0,8
Cr	5,5 x 10 ²	8	2,9 x 10 ¹	1,4 x 10 ⁴	1,6
Cs	6,0 x 10 ¹	2	2,5 x 10 ¹	8,6 x 10 ⁴	0,4
Eu	4	7,0 x 10 ⁻¹	1,4	8,0 x 10 ³	1,3
Fe	7,9 x 10 ⁴	1,7 x 10 ⁴	3,4 x 10 ⁴	1,7 x 10 ⁵	0,3
Hf	1,2 x 10 ¹	2	9,1	8,0 x 10 ⁴	0,4
K	7,3 x 10 ⁴	4,4 x 10 ³	2,8 x 10 ⁴	3,7 x 10 ⁴	1,3
La	1,3 x 10 ²	1,3 x 10 ¹	3,5 x 10 ¹	2,0 x 10 ⁵	0,3
Lu	7,0 x 10 ⁻¹	2,0 x 10 ⁻¹	4,0 x 10 ⁻¹	3,0 x 10 ⁴	2,6
Na	3,2 x 10 ⁴	4,0 x 10 ³	1,7 x 10 ⁴	3,0 x 10 ⁶	0,1
Nd	1,1 x 10 ²	2,0 x 10 ¹	3 x 10 ¹	4,0 x 10 ³	10,0
Rb	3,0 x 10 ²	2,7 x 10 ¹	1,3 x 10 ²	2,0 x 10 ⁴	1,2
Sb	1,1 x 10 ¹	4,3 x 10 ⁻¹	3,3 x 10 ⁻¹	3,6 x 10 ⁴	0,8
Sc	3,3 x 10 ¹	8	1,1 x 10 ¹	5,7 x 10 ⁵	0,2
Sm	1,9 x 10 ¹	3	5,3	3,0 x 10 ⁵	0,2
Sr	1,3 x 10 ³	2,0 x 10 ²	6,4 x 10 ²	5,0 x 10 ³	3,5
Ta	3	5,0 x 10 ⁻¹	0,9	2,6 x 10 ³	7,0
Tb	8	4,0 x 10 ⁻¹	1	5,0 x 10 ³	3,2
Th	4,8 x 10 ¹	2	2,6 x 10 ¹	1,3 x 10 ⁵	0,3
U	9	7,0 x 10 ⁻¹	5	1,1 x 10 ⁴	4,7
Yb	8	1	2,1	1,8 x 10 ⁴	1,3
Zn	7,6 x 10 ²	2,3 x 10 ¹	1 x 10 ²	1,2 x 10 ⁴	1,2

Tabla 3. Rango de concentraciones de elementos en cerámicos arqueológicos típicos comparados con el objeto cerámico estudiado.

entre los valores encontrados y los valores mínimos y máximos esperados para un objeto cerámico arqueológico muestra que el objeto estudiado en el presente caso es completamente típico, aun cuando la concentración encontrada de bario está casi en el borde superior del rango. Es importante notar que la precisión de las señales analíticas de espectrometría gamma es mejor que 1% para ⁷⁶As, ¹³¹Ba, ¹⁴¹Ce, ⁶⁰Co, ¹³⁴Cs, ¹⁸¹Hf, ¹⁴⁰La, ²⁴Na, ¹²²Sb, ⁴⁶Sc, ¹⁵³Sm y ²³³Pa. Asimismo, ⁵¹Cr, ¹⁵²Eu, ⁴²K, ⁸⁶Rb, ¹⁷⁵Yb y ⁶⁵Zn han detectado con estadísticas de medición de órdenes de 1% a 2%. Finalmente, ¹⁷⁷Lu, ¹⁴⁷Nd, ²³⁹Np, ¹⁶⁰Tn, ¹⁸¹Ta presentan señales con estadísticas de medición pobres, entre 3% y 10%.

De los datos de la Tabla 3 se puede inferir que

en el análisis por activación de objetos cerámicos enteros una irradiación de 45 minutos, a un flujo neutrónico térmico de 10⁹ n.cm⁻².s⁻¹ es adecuada, desde el punto de vista de la precisión de las señales analíticas obtenidas, para varios elementos químicos relevantes en estudios arqueológicos. Por otra parte, la precisión para algunos elementos importantes como lutecio, neodimio y tantalio es inaceptablemente pobre.

En principio podría considerarse que el uso de un flujo neutrónico más alto o de un tiempo de irradiación mayor (o ambos combinados) incidiría favorablemente en una mejora de la precisión. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que el flujo neutrónico máximo disponible está limitado por el diseño del reactor nuclear usado. A esta consideración se agregan

los factores inherentes a la seguridad radiológica, con relación a la manipulación de la muestra irradiada. La medición de la dosis en contacto del objeto cerámico irradiado dio un valor de 0,8, $\mu\text{Sv/h}$, después de un tiempo de decaimiento de 10 d. Este valor es el doble del máximo permitido para personal no laboralmente expuesto y representa un problema que debe ser resuelto, ya que es dable suponer que arqueólogos y encargados de colecciones querrán tener las piezas a su disposición en el más breve plazo posible. En la tabla 3 se puede observar que la señal de espectrometría gamma más prominente, después de 10 días de decaimiento, corresponde al ^{46}Sc , con una dimensión del orden de 6×10^5 cuentas, seguida por la señal del ^{39}Fe cuyo orden es de 2×10^5 cuentas. De estos datos se puede inferir que para que la dosis en contacto disminuya a la mitad se debería esperar durante al menos un período de semidesintegración del ^{46}Sc es decir, cerca de tres meses. El tiempo de espera necesario se incrementaría si se usara un flujo neutrónico mayor o un tiempo de irradiación más largo.

Por otra parte, es importante notar que un contenido de 11 mg/kg de escandio (cerca del límite inferior del rango de concentraciones esperado) da señales analíticas del orden de 6×10^5 cuentas para las energías gamma de 889 y 1120 keV en una muestra del orden de 800 g. Es evidente que la precisión con la que se puedan medir señales de energías gamma menores estará significativamente afectada por el fondo debido al efecto Compton de las radiaciones emitidas por el ^{46}Sc . El problema sería apreciablemente mayor si la muestra bajo análisis tuviera un contenido de escandio del orden de 30 mg/kg. Teniendo en cuenta este problema y los aspectos de seguridad radiológica discutidos anteriormente, es posible concluir que el aumento de la fluencia de neutrones térmicos no mejoraría la precisión en la medición de los nucleidos emisores de radiación gamma menor que aproximadamente 1000 keV y con períodos de desintegración más cortos que el del ^{46}Sc .

Una alternativa aplicable es considerar la eventual mejora en la calidad de la espectrometría gamma. Por ejemplo, el uso de un detector de 150% de eficiencia relativa, con una relación pico/Compton de 90, incrementaría la intensidad de las señales detectadas en un factor 2,

mientras el fondo Compton se incrementaría en un factor de 1,6. Si adicionalmente tal detector estuviera provisto de un sistema supresor de fondo Compton, el fondo disminuiría consecuentemente en un factor del orden de 2. Todo esto debería permitir una mejora apreciable de la precisión con la que se podrían medir, en general, las señales de energías bajas. A menudo, dicha precisión está limitada por el alto valor del fondo, que es causado por el efecto Compton de nucleidos tales como ^{46}Sc o ^{24}Na .

Factibilidad del análisis cuantitativo de objetos cerámicos enteros

Examinados los aspectos de precisión y seguridad radiológica que son los tópicos centrales del presente artículo, es importante considerar, de manera apriorística, la factibilidad de realizar el análisis por activación neutrónica instrumental cuantitativo de objetos cerámicos enteros "con errores analíticos menores que 5%". En adición a los factores que determinan la precisión con la que se pueden medir las señales analíticas de interés, la veracidad de los resultados que se obtengan dependerá del método de análisis utilizado. Por ejemplo, el uso del método absoluto o de métodos paramétricos requiere, entre otras, la corrección exacta de la auto-depresión del flujo neutrónico durante la irradiación y la eficiencia de medición durante la espectrometría gamma. Por otra parte el uso del método comparativo conlleva el problema de preparar un patrón de comparación adecuado.

En opinión de los autores, es factible realizar el análisis por activación cuantitativo de objetos cerámicos enteros, empleando el método que se propone a continuación:

- Preparar una réplica del cerámico de interés, con la misma masa, forma y tamaño que el objeto original (dentro de un margen de tolerancia aceptable). Esto no es un problema mayor, ya que existen ceramistas que, de hecho, fabrican réplicas de piezas valiosas, con calidad tal que se exhiben en exposiciones que se realizan en diversas partes del mundo (Fresnais, 2008). Es conveniente preparar la réplica empleando una pasta cerámica de textura fina y de la mejor homogeneidad disponible.
- Tomar pequeñas muestras, del orden de 300 mg cada una, de la réplica preparada, empleando una broca de carburo de tungsteno de alta pureza.

- Determinar las concentraciones de los elementos de interés en dichas muestras, mediante análisis por activación neutrónica instrumental, con la mejor exactitud (precisión y veracidad) posible.
- Irradiar simultáneamente la réplica y el objeto cerámico original, cuidando que ambas reciban el mismo flujo neutrónico, durante el mismo tiempo. Esto requerirá el uso de un dispositivo rotatorio de irradiación, de características especiales, y que se encuentra actualmente en fase avanzada de desarrollo.
- Medir la actividad inducida en la réplica y el objeto original, para cada uno de los nucleidos de interés, mediante espectrometría gama de alta resolución. Es importante asegurar la misma geometría de medición para ambos. Calcular las concentraciones de los elementos de interés en el objeto cerámico problema (original), empleando a la réplica como patrón de

comparación. De esta manera se cancelan factores de corrección importantes, como los de auto-depresión del flujo neutrónico y de la autoabsorción de las señales de espectrometría gamma, así como la eficiencia de detección de las señales analíticas.

El método propuesto representa una mejora significativa con relación a los ya existentes. Actualmente se encuentra en fase de experimentación final, con el objeto de optimizar las condiciones operativas.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo financiero parcial del organismo internacional de energía atómica, mediante el contrato de investigación 15224.

Referencias

- BEDREGAL, P. (2002) *Informe Científico Tecnológico del Instituto Peruano de Energía Nuclear*, ISSN 1684-1662, pp 3.
- BISHOP, R. L.; VELETTA C., CROWN, P.; DE ATLEY, S. P. (1990) *Am. Antiq.* 55(3), 537.
- BISHOP, R. L.; BLACKMAN, M. J. (2002) *Acc. Chem. Res.* 35, 603.
- BISHOP, R. I.; ROSSBACH, M.; PADILLA, R. (2003) IAEA Technical Report Series 416, Vienna, Austria.
- BISHOP, R. L. (2003) IAEA Technical Report Series 416, Ch.2, Viena, Austria.
- BISHOP, R. L.; NEFF, H. (1989) *Archaeol. Chem.* 4, 57.
- BISHOP, R. L. (1999) *Patterns and Process. Smithsonian Center for Materials Research and Education*, Washington, DC.
- BODE, P., OVERWATER, R. M. W.; DE GOEIJ, J. J. M. (1997) *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 216(1) 5.
- DE CORTE, F. (1987) *The k0 Standardization Method. Habil. Thesis*, University of Ghent.
- DE CORTE, F.; SIMONITS, A. (2003) *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 85, 47.
- FRESNAIS, R. (2008), *Les secrets de fabrication de la salle du trésor – Caen*. Archives actualité quotidienne. Caen, disponible en <http://www.caen.maville.com/actualite/2008/09/25/caen/les-secrets-de-fabrication-de-la-salle-du-tresor-c-est-le-perou-17553545.html> (última consulta realizada en enero de 2009)
- GLASCOCK, M. D.; NEFF, H. (2003) *Meas. Sci. Technol.* 14, 1516.
- KULEFF, I. DJINGOVA, R. (1998) *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 237, No. 1-2, 3.
- LIN, X.; HENKELMAN, R. (2002) *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 251(2), 197.
- OVERWATER, R. BODE, P.; DE GOEIJ, J. J. M.; HOOGENBOOM, J. E. (1996) *Anal. Chem.* 68, 341.
- SAYRE, E. V., DODSON, R. W. (1957), *Am. J. Archae.* 61, 35.
- SAYRE, E. V; MURRENHOFF, A. WEICK, C.F. (1958) *The Non-destructive Analysis of Ancient*, National Laboratory Report 518, Upton NY.

INSTRUCCIONES PARA LA PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS

El presente instructivo reúne las condiciones generales de presentación y formato e información general para todos los interesados en remitir sus contribuciones.

Presentación de los textos

Los trabajos, en versión impresa (original y copia), podrán ser remitidos a los miembros del Comité Editorial:

Lic. Miguel Languasco
Dr. Isaac Marcos Cohen

Facultad Regional Buenos Aires
Secretaría Académica
Medrano 951
(C1179AAQ) Buenos Aires, República Argentina

Recomendaciones generales

Proyecciones es una publicación destinada a un público amplio, con formación específica en diferentes campos del conocimiento, que se distribuye en diversos países de habla castellana. Por tal razón, se recomienda a los autores preservar la pureza y la claridad idiomática de sus textos y evitar el uso de vocablos de uso corriente en disciplinas particulares, pero no conocidos (o con significado distinto) en otros ámbitos. Asimismo, no deberán emplearse palabras derivadas de traducciones incorrectas (por ejemplo, asumir en lugar de suponer, o librería por biblioteca) o pertenecientes a otros idiomas, salvo cuando no existan en castellano equivalencias válidas, o cuando se refieran a técnicas o procesos conocidos por su denominación en la lengua original.

Se recomienda también evitar el uso indiscriminado de mayúsculas cuando se haga mención sustantivos comunes, como por ejemplo elementos químicos o técnicas particulares.

Es conveniente, en todos los casos, efectuar una adecuada revisión ortográfica y de sintaxis de los textos antes de su envío.

Pautas específicas

Se deberán contemplar las siguientes pautas:

La presentación corresponderá a un formato adecuado para hojas tamaño A4 (21 cm x 29,7 cm) escritas con interlineado simple, conservando los siguientes márgenes: superior e inferior, 2,5 cm; derecho e izquierdo, 3 cm; encabezado y pie de página, 1,2 cm. La fuente escogida es Tahoma, tamaño 12. Se recomienda muy especialmente a los autores respetar esta pauta, pues las conversiones posteriores desde otras fuentes, diferentes a la mencionada, pueden representar la distorsión o la pérdida de caracteres especiales, como las letras griegas. Se deberá emplear sangría en primera línea de 1 cm y alineación justificada en el texto.

En la página inicial se indicará el título en negrita, centrado y con mayúscula sólo en la primera letra de la palabra inicial; en otro renglón, también en negrita, iniciales y apellido del (de los) autor(es) y, finalmente, en *itálica*, el nombre y la dirección postal de la(s) institución(es) a la(s) que pertenece(n), junto con la dirección de correo electrónico del autor principal.

A continuación, dejando tres espacios libres, el texto, en espacio simple, comenzando con un resumen de 50 a 100 palabras, en castellano e inglés, también en negrita y con tamaño de fuente 10. Luego del resumen, deberán consignarse las palabras clave que orienten acerca de la temática del trabajo, hasta un máximo de cinco. Asociaciones válidas de palabras (por ejemplo, contaminación ambiental, fluorescencia de rayos X) se considerarán como una palabra individual.

Se aconseja ordenar al trabajo de acuerdo a los siguientes ítems: Introducción, Parte Experimental, Resultados y Discusión, Conclusiones, Agradecimientos (si existieren) y Referencias. Cada uno de ellos tendrá categoría de título y deberá ser presentado en forma equivalente al título original del trabajo, en negrita y centrado, mientras que los subtítulos se consignarán en el margen izquierdo y en negrita. Ninguno de estos ítems deberá ser numerado. La extensión del trabajo no podrá ser mayor que 20 páginas.

En hoja aparte se indicará el tipo de procesador de texto utilizado y la versión correspondiente.

Los autores deberán entregar un disquete conteniendo su trabajo y diagramado en la forma propuesta para la versión final impresa.

Tablas y Figuras

Las figuras deberán ser ubicadas en el texto, en el lugar más cercano a su referencia, con números arábigos y leyendas explicativas al pie. Las imágenes fotográficas deberán estar al tamaño 1.1 a 300 ppi, en formato tif, jpg o eps. Los gráficos o dibujos se presentarán, preferentemente, en vectores (formato .cdr o .ai); en el caso de estar presentados en forma de mapa de bits su resolución en 1.1 deberá ser mayor a 800 ppi. No podrán reproducirse figuras en color.

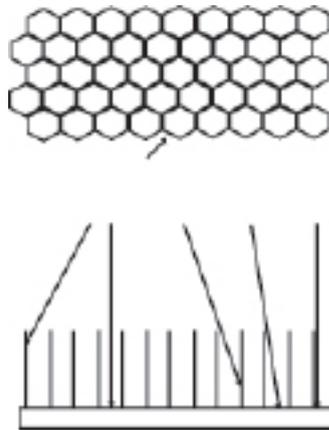


Figura 1. Ejemplo de ubicación de la figura y su leyenda explicativa (centrada, en negrita y fuente 10)

Las tablas se incluirán en el lugar más cercano a su referencia, con números arábigos y acompañadas con un título auto-explicativo en el encabezado.

Tabla 1. Ejemplo de formato para tabla y título (centrada, en negrita y fuente 10)

Magnitud	Condición A	Condición B
Magnitud A	1a	1b
Magnitud B	2a	2b

Agradecimientos

Los agradecimientos deberán ser escuetos y específicos, vinculados al trabajo presentado. Serán suprimidos los de naturaleza general o no aplicables a la contribución.

Referencias

Las referencias se consignarán en el texto indicando el apellido del autor (o primer autor, en trabajos de autoría múltiple) y el año de la publicación. Ejemplos: Gould (1958); Sah y Brown (1997); Probst y colaboradores (1997). Cuando la referencia se coloque a continuación de una oración completa en el texto, la forma indicada se convertirá en: (Gould, 1958). Las referencias múltiples se indicarán bajo un único par de paréntesis; ejemplo: (Sah y Brown, 1997; Probst y colaboradores, 1997). El ítem Referencias contendrá todas las citas consignadas en el texto, ordenadas alfabéticamente, tomando el apellido del primer autor. Los artículos incluidos en publicaciones colectivas deberán figurar en el orden: apellido e iniciales de todos los autores; entre paréntesis, año de publicación; abreviatura internacionalmente aceptada de la publicación; volumen; primera página del artículo. Las referencias a libros consignarán iniciales y apellido de todos los autores; título; página (si corresponde); editorial: Ejemplos:

GOULD, E. S. (1958) *Curso de Química Inorgánica*. Selecciones Científicas, Madrid, España.

PROBST, T.; BERRYMAN, N.; LARSSON, B. (1997) Anal. Atom. Spectrom. 12, 1115.

SAH, R.; BROWN, P. (1997) Microchem. J., 56, 285.

No deberán incluirse, bajo el ítem **Referencias**, citas bibliográficas no mencionadas específicamente en el texto del trabajo.

Mecanismos de Aceptación y Normativa General

Los trabajos serán revisados por reconocidos especialistas, designados por el Comité Editorial. El dictamen será, en cada caso: a) aprobado en su versión original; b) aprobado con pequeñas modificaciones; c) revisado, con necesidad de modificaciones significativas; d) rechazado. En los casos diferentes a su aprobación directa, los trabajos serán enviados a los autores. Cuando se trate de cumplir con modificaciones sugeridas por los árbitros, los trabajos serán sometidos a una nueva evaluación.

El envío de una contribución para *Proyecciones* supone que ésta no ha sido publicada previamente y, adicionalmente, la cesión de los derechos de publicación por parte de los autores. Cuando el trabajo ha sido ya presentado en una reunión científica (sin publicación de actas) o inspirado en una presentación de esta naturaleza, se aconseja citar la correspondiente fuente.

Doctorado, Maestrías y Carreras de Especialización

Doctorado en Ingeniería

Mención en Procesamiento de Señales e Imágenes

Maestría en Ingeniería Ambiental

Maestría en Ingeniería en Calidad

Maestría en Ingeniería en Sistemas de la Información

Maestría en Administración de Negocios

Maestría en Tecnología de los Alimentos

Maestría en Docencia Universitaria

Maestría en Gestión de la Educación Superior

Especialización en Ingeniería Clínica

Especialización en Ergonomía

Especialización en Preparación y Evaluación de Proyectos

Cursos de Posgrado

Dirección de Empresas

Automación Industrial

Higiene y Seguridad en el Trabajo

Generación de Empresas Innovadoras

Carreras de Grado

Ingeniería Civil

Ingeniería Eléctrica

Ingeniería Electrónica

Ingeniería Industrial

Ingeniería Mecánica

Ingeniería Naval

Ingeniería en Sistemas de la Información

Ingeniería Química

Ingeniería Textil

Ciclos de Licenciatura

Licenciatura en Ciencias Aplicadas

Licenciatura en Tecnología Educativa

Licenciatura en Gestión de la Producción Gráfica

**Proyecciones se terminó de imprimir en los talleres gráficos Forma Color
Impresores S.R.L. Camarones 1768 (C1416ECH),
Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina
Abril de 2009**