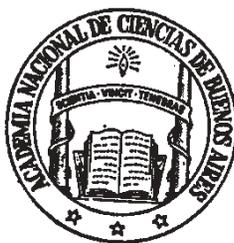


**UNA VISIÓN CIENTÍFICA
DE LA RADIOACTIVIDAD
DESDE SU DESCUBRIMIENTO
HASTA NUESTROS DÍAS**



BUENOS AIRES
2009

**UNA VISIÓN CIENTÍFICA
DE LA RADIOACTIVIDAD
DESDE SU DESCUBRIMIENTO
HASTA NUESTROS DÍAS**

*Seminario organizado
por el Instituto de Investigación y Desarrollo
de la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires
el 5 de diciembre de 2007*



Instituto de Investigación y Desarrollo
2009

Radioactividad / coordinado por Mariano N. Castex. - 1ª ed. - Buenos Aires : Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires, 2009.

68 p. ; 23 × 16 cm.

ISBN 978-987-537-093-7

1. Radioactividad. I. Castex, Mariano N., coord.

CDD 621.483 7

Fecha de catalogación: 22/07/2009

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Director: Dr. AMÍLCAR E. ARGÜELLES

La publicación de los trabajos de los académicos y disertantes invitados se realiza bajo el principio de libertad académica y no implica ningún grado de adhesión por parte de otros miembros de la Academia, ni de ésta como entidad colectiva, a las ideas o puntos de vista de los autores.

Todos los derechos reservados

Hecho el depósito que establece la Ley 11.723

IMPRESO EN ARGENTINA

© ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS DE BUENOS AIRES

Avda. Alvear 1711, 3^{er} piso – C.P. C1014AAE – Ciudad Autónoma de Buenos Aires – República Argentina

<http://www.ciencias.org.ar>

e-mail: info@ciencias.org.ar

ISBN: 978-987-537-093-7

ÍNDICE

<i>Apertura por el Dr. Fausto T. L. Gratton</i>	7
<i>Introducción del Prof. Dr. Roberto C. Mercader</i>	9
 <i>Disertantes:</i>	
Prof. Dr. Roberto C. Mercader <i>Maria Curie y la “Ciencia de la Radioactividad”</i>	11
Prof. Carlos D. Galles <i>Los grandes descubrimientos en Física a fines del siglo XIX ..</i>	25
Ing. Juan Carlos Ferreri <i>Radiaciones y regulación (de las radiaciones ionizantes de origen nuclear)</i>	37
Prof. Dr. Mario A. Pisarev <i>Historia de las aplicaciones biomédicas de las radiaciones y los radioisótopos</i>	59

Coordinador:

Prof. Dr. Roberto C. Mercader

ANTECEDENTES CIENTÍFICOS

ROBERTO C. MERCADER es Profesor Titular de la UNLP e Investigador del CONICET. Ha sido Profesor e Investigador Visitante en universidades de EE.UU. y Europa. Es miembro del *Mössbauer Century Club* y del Comité Latinoamericano de Espectroscopía Mössbauer. Es Miembro Titular del Instituto de Investigación y Desarrollo de la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires. Sus áreas de investigación son magnetismo de sistemas nanoestructurados y aplicaciones del efecto Mössbauer a la ciencia de materiales. Le interesan temas interdisciplinarios entre la física y otras ciencias naturales y las investigaciones en didáctica de las ciencias.

CARLOS D. GALLES es Profesor Titular de la Universidad Nacional de Rosario y Profesor Asociado de la Universidad Tecnológica Nacional. Ha trabajado en temas de investigación en Física Teórica e Historia de la Ciencia, siendo autor de unas cincuenta publicaciones. Fue presidente del Grupo Argentino de Historia de la Ciencia y de la Sociedad Latinoamericana de Historia de las Ciencias y de la Tecnología. También fue miembro asesor de la División de Historia de la Ciencia de la UNESCO. Fue distinguido en 2006 con el premio “Diego Alcorta” por la Sociedad Argentina de Humanismo Médico.

JUAN CARLOS FERRERI es Gerente de Apoyo Científico Técnico de la Autoridad Regulatoria Nuclear e Investigador del CONICET. Recibió en 2004 el Premio de la Asociación Argentina de Mecánica Computacional a la “Trayectoria en Investigación, Docencia y Profesional en Argentina”. Es Miembro Titular del Instituto de Investigación y Desarrollo de la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires. Su línea de investigación está dirigida a establecer las limitaciones en los códigos de cálculo usuales de aplicación industrial en Ingeniería Nuclear.

MARIO ALBERTO PISAREV es Investigador Superior del CONICET, Jefe del Departamento de Radiobiología de la Comisión Nacional de Energía Atómica y Profesor Titular de la Universidad de Buenos Aires. Recientemente ha sido incorporado a la Academia Nacional de Medicina de Francia como Miembro Asociado Extranjero. Desarrolla sus investigaciones sobre bases bioquímicas y moleculares de la regulación tiroidea en condiciones normales y patológicas.

APERTURA POR EL DR. FAUSTO T. L. GRATTON

Está abierta la Sesión Pública de la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires “Una visión científica de la radioactividad desde su descubrimiento hasta nuestros días”, auspiciada por el Instituto de Investigación y Desarrollo de nuestra corporación.

Vamos a rememorar hoy el descubrimiento de la radioactividad y con ello la iniciación del espíritu humano en la exploración del misterio de lo más profundo. Blaise Pascal, matemático, físico, y místico genial afirma en uno de sus célebres pensamientos (el 199, sobre la desproporción del hombre), que la humanidad vive como suspendida entre dos extremos, lo infinitamente más grande y el abismo de lo infinitamente más pequeño. Abraham País, con la autoridad de quien participó de algunas etapas de esa aventura, lo llama el viaje hacia el interior, en su libro *Inward Bound*.

Se cumplen unos cien años de una década en la que se revelaron nuevos fenómenos que iban a cambiar de un modo entonces impredecible el desarrollo de la física y cuyas consecuencias iban a tener un impacto insospechado sobre la historia de la humanidad. Desde que me incorporé a esta Academia a fines de 2001 sentí que era tarea de la Sección de Ciencias Exactas y Naturales no dejar pasar en silencio este aniversario. Hoy, gracias a la iniciativa del Dr. Mercauder y la gentil colaboración de distinguidos científicos, la Academia puede cumplir con ese deber.

La década en cuestión podría definirse dentro del lapso que va desde 1895 hasta 1907. Naturalmente la historia se desarrolla con continuidad indiferente a las divisiones intelectuales más o menos arbitrarias que empleamos para facilitar la descripción y comprensión. Pero creo que muchos estarán dispuestos a aceptar que los primeros pasos de la infancia de la disciplina, la etapa heroica de los esposos Curie y los trabajos sobre las familias radioactivas de Ernest Rutherford, completan ese período. En 1908 la radioquímica ya estaba consagrada como ciencia con la asignación del premio Nobel a Rutherford y estaba por comenzar otra etapa, todavía de la infancia

de la física nuclear, pero con nuevas sorprendentes características que tal vez podamos rememorar en otra reunión de años venideros.

El Dr. Mercader es el Cordinador de la Jornada. Luego de su exposición, a él le corresponde dirigir el encuentro. Lo voy a presentar formalmente. Roberto Mercader es Doctor en Física, Profesor Titular de la Universidad Nacional de La Plata e Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Ha sido Profesor e Investigador Visitante en universidades de EE.UU. y Europa. Es miembro del *Mössbauer Century Club* y del Comité Latinoamericano de Espectroscopía Mössbauer. Sus áreas de investigación son el magnetismo de sistemas nanoestructurados y las aplicaciones del efecto Mössbauer a la ciencia de materiales. Es miembro del Instituto de Investigación y Desarrollo de nuestra Academia. Se interesa de temas interdisciplinarios entre física y otras ciencias naturales. También se ocupa de investigación educativa en didáctica de las ciencias.

Antes de iniciar su tema específico el Dr. Mercader va a explicar su concepto del encuentro. Luego de su disertación le voy pasar el centro con el pedido de ser preciso con los tiempos porque tenemos cuatro disertaciones. En la primera sección evocaremos el ayer, la etapa del descubrimiento como parte de la gran aventura del espíritu humano en su búsqueda incesante por comprender el mundo. Luego de un breve intervalo, en la segunda sección se hablará de la actualidad: la etapa presente de la madurez. Recordaremos las responsabilidades emergentes del uso de la radioactividad, culminando con los beneficios de su empleo en las ciencias biomédicas. La sesión de preguntas y comentarios se hará después de cada sección, es decir al fin de la primera parte y al final de la segunda parte.

Las mismas radiaciones que pueden dañar también pueden salvar y proveer energía útil. Es extraño y maravilloso reflexionar que las mismas radiaciones que tememos son las que participaron en los cambios genéticos que, a través de la gran evolución de la vida, abrieron el camino a la aparición de este insólito ser humano. El cual, de nuevo con Pascal, pensamiento 200, es como una frágil caña que puede ser aplastado en cualquier momento por el universo que lo rodea, y que sin embargo posee una dignidad que sobrepasa toda esa gigantesca pero ciega fuerza material, puesto que la puede comprender con la luz de su inteligencia. Cito, "...*Pero aun cuando el universo le aplastase, el hombre sería más noble de lo que le mata, puesto que el sabe que muere y la ventaja que tiene el universo sobre él. El universo no sabe nada...*".

El Dr. Mercader tiene la palabra para referirse al evento y a su exposición intitulada "*María Curie y la 'Ciencia de la Radioactividad'*".

INTRODUCCIÓN

DEL PROF. DR. ROBERTO C. MERCADER

En esta jornada, juntamente con la celebración del centenario de la finalización de la llamada “Década de la Radioactividad” y la entrada a escena de la física nuclear, intentamos enfatizar el carácter humano de la investigación científica como una de sus construcciones más extraordinarias. La ciencia es ese camino que tiene como protagonistas a personas inmersas en un contexto histórico y epistemológico que, con enorme esfuerzo y sacrificio, enfrentaron los problemas que iban apareciendo y encontraron en la investigación un motivo superador para sus vidas y para la humanidad. Para este fin, convocamos a participar de la jornada a tres oradores que resaltaron aspectos diferentes de la trascendencia que tuvo el descubrimiento de la radioactividad a fines del siglo XIX y la vigencia de aquellos primeros pasos en nuestros días.

El programa está compuesto por una conmemoración, a cargo del Coordinador, Dr. R. C. Mercader, acerca del descubrimiento y de la magnitud del aporte de la primera mujer en obtener un doctorado en Francia, Maria Sklodowska Curie.

Luego, el Prof. C. D. Galles dará una visión general de los descubrimientos de la física de fines del siglo XIX.

Resaltando la vigencia que las investigaciones de aquella época tienen en nuestros días, el Ing. J. C. Ferreri nos mostrará la manera en que debemos considerar las acciones que emprendemos en campos científicos, las cuales no son neutras sino que conllevan la necesidad de aceptar la responsabilidad de los resultados de esos descubrimientos y la manera en que esto obliga a hacer un uso adecuado de las radiaciones.

Finalmente, el Dr. M. Pisarev nos hablará de la importancia que en la actualidad tienen las aplicaciones biomédicas de las radiaciones y del rol pionero que le cupo a la República Argentina en este tema.

MARIA CURIE Y LA “CIENCIA DE LA RADIOACTIVIDAD”

Prof. Dr. ROBERTO C. MERCADER

Antecedentes

En los últimos años del siglo XIX se produjeron una serie de descubrimientos científicos de enorme importancia que, por un lado, desafiaban abiertamente las creencias de ese momento y, por otro, sembraron las bases para el extraordinario desarrollo de la ciencia que tuvo lugar en el primer cuarto del siglo XX. Esos hallazgos –previos al conocimiento de la existencia del núcleo atómico– que condujeron a lo que se llamó en ese entonces la “ciencia de la radioactividad”, fueron de tanta trascendencia que la Academia de Ciencias de Suecia los consideró dignos de ser laureados con los primeros Premios Nobel, instituidos en 1901.

En un breve resumen, los descubrimientos hechos durante el último lustro del siglo XIX relacionados con la radioactividad tuvieron la siguiente cronología:

En **1895** *Wilhelm Röntgen (1845-1923)* descubrió en Würzburg los rayos X (“rayos Röntgen”), por lo que fue galardonado con el primer Premio Nobel de Física en 1901.

En **1896** *Henri Becquerel (1852-1908)* descubrió en París los “rayos Becquerel” (la radioactividad). Por este hecho compartió la mitad del Premio Nobel de Física de 1903; la otra mitad se otorgó a los esposos María y Pierre Curie.

En **1897** *Joseph John Thompson (1856-1940)* descubrió el electrón en Cambridge; por ello Thompson obtuvo el Premio Nobel de Física en 1906.

En **1898** *Maria Sklodowska (1867-1934)* y *Pierre (1859-1906) Curie* descubrieron en París el radio y el polonio, por lo que ella fue distinguida con el Premio Nobel de Química en 1911, convirtiéndose así en la primera persona en obtener dos premios Nobel.

María Skłodowska

Tratándose de una jornada dedicada a la radiactividad, debemos comenzar mencionando a la persona (figura 1) que tuvo el empuje necesario para llevar las investigaciones sobre los recientemente descubiertos “rayos Becquerel” hasta un nivel tal que le permitió no solamente finalizar una tesis doctoral que, en opinión del tribunal (dos de cuyos miembros, Gabriel Lippmann y Henri Moissan, recibieron más tarde el premio Nobel), representó la mayor contribución



Fig. 1. María Skłodowska (1895).

científica hecha por una tesis doctoral hasta ese momento, sino fundar una década después el *Institut du Radium*, centro del que surgieron resultados de enorme trascendencia mundial.

Un poco de historia

María Skłodowska (la menor de cinco hermanos) nació en Varsovia en 1867. Huérfana de madre a los once años, su padre le enseñó sus primeras lecciones de física y química, pero, salvo por algunas incursiones clandestinas, no pudo seguir con sus estudios en Polonia porque bajo la dominación rusa no se permitía a los polacos emprender estudios avanzados.

Después de trabajar como institutriz desde los 15 años, pudo llegar, cuando ya tenía 24 años, a la Universidad de París. Sus duros años de estudiante no le impidieron obtener el primer puesto de su promoción de licenciatura en física en 1893 y el segundo de la licenciatura en matemáticas en 1894.

En 1895 conoció a Pierre Curie (figura 2), un soñador e idealista como ella, con quien se casó en julio de ese año. Pronto logró convencerlo para que presentase su inconclusa tesis doctoral sobre la dependencia térmica del magnetismo en medios materiales.

En 1896 Becquerel descubrió que las sales de uranio emitían unas radiaciones que tenían propiedades semejantes a los rayos de Röntgen porque velaban las placas fotográficas en la oscuridad. El enorme impacto de los rayos X y sus aplicaciones médicas eclipsaron el descubrimiento de Becquerel. Maria, contrariamente a la mayoría de sus contemporáneos, no dudó en profundizar ese tema para sus estudios doctorales. En pocos días, Maria descubrió que el torio emitía el mismo tipo de rayos que el uranio, y que, sorprendentemente, la intensidad de la radiación no dependía de la naturaleza química de los compuestos sino solamente del número de átomos de torio o de uranio que contuvieran las muestras.



Fig. 2. Pierre Curie.

Cuando Pierre Curie vio la importancia de los primeros descubrimientos de su esposa, decidió dejar, “temporalmente”, sus estudios sobre cristales (había descubierto con su hermano Jacques la *piezoelectricidad*, propiedad que tienen algunas sustancias de desarrollar una diferencia de potencial cuando se las somete a esfuerzos) y sobre el magnetismo y ayudarla en sus investigaciones.

Electrómetro piezoeléctrico de Curie

El método por el que Becquerel medía la radiactividad de una muestra era el mismo por el que había descubierto el fenómeno: la intensidad de la radiación era cualitativamente proporcional a cuánto se velaba una placa fotográfica. Desde sus primeros trabajos, sin embargo, Becquerel había encontrado ya que los rayos provenientes del uranio tornaban conductores de la electricidad a los gases por los que pasaban.

Cuando Maria ingresó al laboratorio de su esposo, se encontró con un electrómetro desarrollado por Jaques y Pierre Curie que utilizaba la recientemente descubierta piezoelectricidad de una lámina de cuarzo para medir corrientes débiles. En lugar de medir la intensidad de radiación por la capacidad de velar placas fotográficas, Maria utilizó el electrómetro piezoeléctrico de Curie para medir cuantitativamente la intensidad de la radiación de sus muestras por la magnitud de las débiles corrientes eléctricas que producían cuando atravesaban aire en presencia de un campo eléctrico.

En la figura 3 se puede ver el dispositivo que utilizó Maria Curie para medir la radioactividad de una muestra que colocaba sobre la placa B (mantenida a un potencial elevado) del capacitor de placas A y B. La placa A está conectada a un electroscopio E, cuyas hojuelas se separan proporcionalmente a la carga eléctrica que tengan. En lugar de medir la separación, se utilizaba el electrómetro como instrumento de cero, cargando las hojuelas con la carga opuesta proveniente de una lámina de cuarzo Q sometida a un esfuerzo proporcional a la pesa colocada en la balanza π . De esta manera, pudo establecer un método rápido y cuantitativo para medir la intensidad de la radiación que producía cualquier muestra.

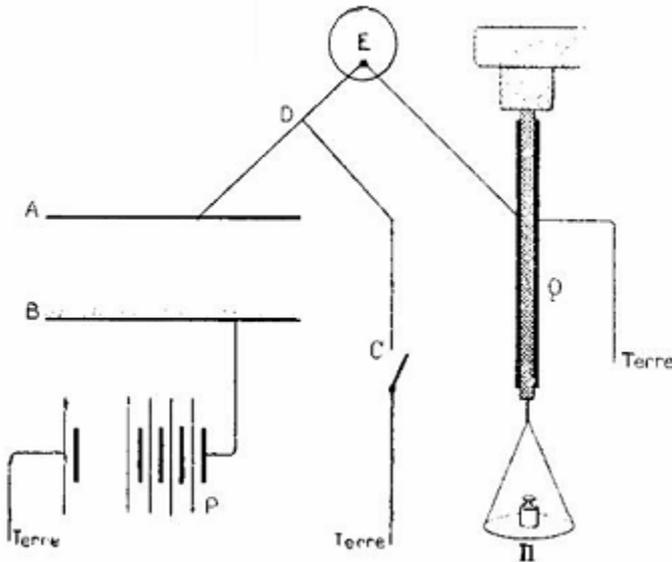


Fig. 3. Medida de la intensidad de la radioactividad.

Radioactividad

Los compuestos químicos del mismo elemento tienen diferentes propiedades; un compuesto de uranio puede ser un polvo negro, otro, un cristal amarillo. Sin embargo, el factor que determina la intensidad de su radiación es solamente la cantidad de átomos de uranio que contengan. Maria llegó a la conclusión **revolucionaria** de que la capacidad de irradiar no podía depender del arreglo de los átomos en la molécula del compuesto sino provenir solamente del **interior del átomo mismo**. Este concepto constituyó un **enorme** aporte al desarrollo de la física. En las publicaciones que culminaron con su tesis, Maria Curie acuñó la palabra **radioactividad**.

Maria extendió sus investigaciones a todos los elementos de la tabla periódica y encontró que solamente el uranio y el torio emitían esas radiaciones. Simultáneamente al desarrollo de la tesis de Maria, Rutherford pudo completar su investigación sobre esas radiaciones, a las que llamó rayos α , β , y γ , distinguiéndolas por sus trayectorias dentro de un campo magnético (figura 4). Estas investigaciones fueron posibles gracias a muestras radioactivas intensas que le prepararon los esposos Curie.

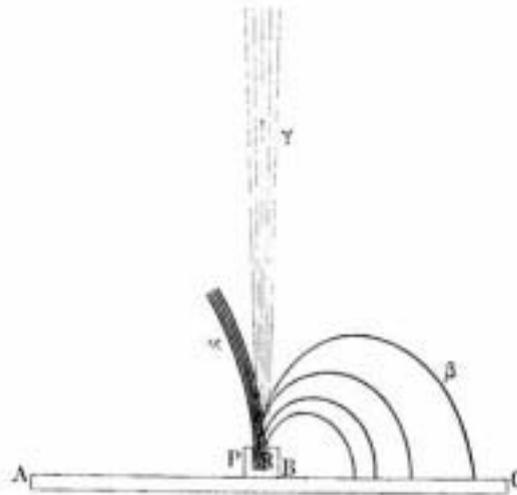


Fig. 4. Figura de la tesis de Maria Curie para demostrar las propiedades de los rayos emitidos por una sustancia radioactiva cuando se desplazan en presencia de un campo magnético perpendicular y hacia adentro del plano de la figura.

Nuevos elementos químicos

El mayor esfuerzo de los Curie estuvo volcado al aislamiento de dos substancias que parecían tener una radiactividad mucho mayor que la que provenía de su contenido de uranio o de torio. En sus notas biográficas, Maria cuenta la sorpresa que tuvieron al ver que la *pechblenda* (mineral compuesto casi en su totalidad de óxido de uranio) irradiaba mucho más que la suma de los átomos de uranio y torio que poseía, por lo que planteó la necesidad de la existencia en la muestra de **elementos químicos desconocidos** hasta entonces.

Este proceso de separación de las fracciones más radiactivas de las muestras les demandó tres años. La magnitud de la tarea que emprendieron los Curie se puede entender si consideramos que por tonelada de pechblenda se obtienen entre 200 y 300 mg de la fracción más radioactiva. Este arduo camino lo emprendieron con muy pocos medios y una gran precariedad de instalaciones, utilizando como laboratorio un galpón “miserable” de la universidad (según las propias palabras de Maria).

Por métodos químicos disolvían en distintos ácidos grandes cantidades de pechblenda. Había dos fracciones que sobresalían de todas las demás por ser las más radiactivas; eran las sales que se separaban junto con las de bismuto y de bario. Postuló la existencia de un elemento unido a las sales del bismuto que llamó POLONIO, y otro a las sales del bario que llamó RADIO.

Una de las propiedades más extraordinarias de los rayos emitidos por el radio era que calentaban el entorno donde se encontraban sin que se pudiera observar ninguna reacción química concomitante. Fiel a una impecable tradición científica, Maria no se aventuró a postular ninguna hipótesis sobre el origen de la radioactividad: *“Mais si la nature du rayonnement est actuellement mieux connue, la cause de la radioactivité spontanée reste mystérieuse, et ce phénomène es toujours pour nous une énigme et un sujet d’étonnement profond”*.

El radio y el premio Nobel de 1903

Con el descubrimiento del radio se abrió un universo de aplicaciones, casi todas ellas relacionadas con las propiedades terapéuticas de las nuevas radiaciones. Se las comenzó a utilizar con gran éxito para el tratamiento de carcinomas primeramente en Francia; luego

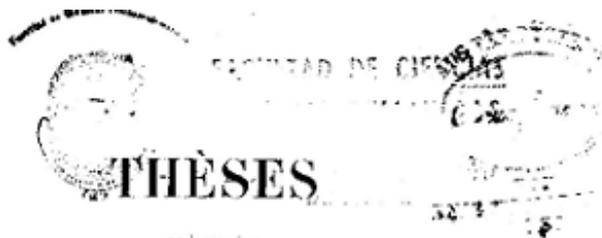
se extendió por todo el mundo lo que llevó el nombre de **radioterapia** (figura 5).



Fig. 5. Aparato para tratamiento con radioterapia de principios del siglo XX.

1903 fue un gran año para los Curie. El 15 de junio Maria defendió su tesis doctoral cuya portada se muestra en la figura 6. No solamente fue la primera mujer en Francia en alcanzar un doctorado sino que en octubre les otorgaron a ella y a Pierre, en forma conjunta con Becquerel, el premio Nobel de Física. A Becquerel, por el descubrimiento de la radioactividad espontánea, y a Pierre y a Maria, por sus investigaciones sobre el fenómeno de la radiación descubierta por Becquerel. Como curiosidad, cabe mencionar que cuando se hicieron públicos los archivos del premio de 1903 de la Fundación Nobel, se pudo verificar que la Academia de Ciencias de Francia sólo había nominado a Henri Becquerel y a Pierre Curie para ser galar-

SÉRIE A. N° 145
N° D'ORDRE
1127.



A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

M^{me} SKLODOWSKA CURIE.

1^{re} THÈSE. - RECHERCHES SUR LES SUBSTANCES RADIO-
ACTIVES.

2^e THÈSE. - PROPOSITIONS HONORÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 7 juin 1903, devant la Commission d'Examen.

MM. LIPPMANN, *Président*,
BOUTY, *Examinateurs*,
MOISSAN, *Examinateurs*.



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DE BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1903

Fig. 6. Portada de la Tesis Doctoral de Mme. Curie en la Biblioteca del Departamento de Física de la Universidad Nacional de La Plata. "Investigaciones sobre substancias radioactivas". Comité examinador: Lippmann, Bouty, Moissan.

donados; el nombre de Maria se incluyó posteriormente por sugerencia del matemático Gösta Mittag-Leffler, profesor de la Universidad de Estocolmo.

Por la radioterapia y el gran potencial de las aplicaciones médicas del radio en medicina, se construyeron rápidamente grandes instalaciones en los EE.UU. para producirlo en gran escala. Cuando se planteó la pregunta de si Pierre y Maria debían patentar el proceso de producción, idealistas como eran, ambos estuvieron en desacuerdo; la investigación científica debía hacerse por vocación y por su interés intrínseco. Un investigador no debía inmiscuirse en cuestiones comerciales y desinteresadamente debía poner a disposición de la sociedad el resultado de su trabajo. No solamente tenían esta forma de pensar, sino que ambos generosamente entregaban las muestras que tan trabajosamente habían preparado a sus colegas (incluido Rutherford, como se ha mencionado arriba). Más aún, sin ningún resguardo brindaron los detalles de la fabricación del radio a la industria.

Maria Curie primera profesora en la Sorbona

Víctima de un accidente de tránsito, el 19 de abril de 1906 muere Pierre Curie en París. La Universidad le ofreció una pensión a Maria, quien respondió que a los 38 años de edad ella era capaz de ganarse la vida por sí misma. Se la postuló para ser la sucesora de su marido, lo que fue aprobado en noviembre de 1906, convirtiéndose así en la primera mujer en dar clase en la Sorbona (en 1906) y en ser nombrada profesora en 1908.

Continuó con sus estudios para perfeccionar la producción de radio, lo que le permitió producir unos cientos de miligramos de cloruro de radio muy puro primero y, luego con la ayuda de su gran colaborador, André Debierne, obtener radio metálico.

Nuevo premio Nobel en 1911

En 1911 se le otorgó el Premio Nobel de Química en “reconocimiento por sus contribuciones al avance de la química, por el descubrimiento de los elementos radio y polonio, por la purificación del radio y por el estudio de su naturaleza y de los compuestos de tan notable elemento”. Maria Curie hasta ahora es la única persona que

ha recibido dos premios Nobel correspondientes a campos científicos diferentes.

A pesar de sus logros científicos, de haber sido elegida miembro permanente de las conferencias Solvay, de haberse creado en su honor en Varsovia el Instituto de Radioactividad y de haber obtenido el premio Nobel de Química, 1911 fue un año terrible para Maria Curie. A fines de 1910 aceptó una propuesta de nominación para ingresar a la Academia de Ciencias de Francia. Hasta ese momento el ingreso de un nuevo académico nunca había despertado demasiado interés en la prensa francesa. Sin embargo, en esta ocasión, los grupos nacionalistas y antisemitas que habían actuado en el proceso Dreyfus aún permanecían muy activos y lograron atizar los sentimientos xenófobos, antisemitas y sexistas que existían en la sociedad francesa. Basándose en acusaciones falaces y originando una gran movilización de hombres de prensa, lograron que la Academia no aceptara la incorporación de Maria.

Escándalo con Langevin

No contentos con haber impedido su ingreso a la Academia, durante la estadía de Maria en Bélgica en la primera conferencia Solvay, difundieron detalles privados de su relación con su discípulo Paul Langevin que, puestos en un contexto xenófobo, lograron concitar la mayor atención y alcanzar hasta las más altas esferas académicas y gubernamentales donde se llegó a cuestionar si ella tenía derecho a continuar como catedrática de la Sorbona. A pesar de que algunos académicos se animaron a sugerir que no lo hiciera, Maria asistió a la ceremonia de entrega de su premio Nobel en Estocolmo.

No se conoce con certeza qué intención tenían quienes llevaron el escándalo tan lejos, pero, visto en perspectiva, resulta evidente que todo el episodio no habría tenido ninguna trascendencia de no ser porque prevalece un criterio distinto para juzgar la vida privada de las mujeres del que se utiliza para juzgar la de los hombres.

Primera Guerra Mundial

Durante toda la Primera Guerra Mundial (1914-1918) Maria dedicó muchísimo tiempo para desarrollar y equipar en su laboratorio vehículos que pudieran transportar máquinas de rayos X hasta el



Fig. 7. Vehículo desarrollado y conducido por Maria Curie para llevar máquinas portátiles de rayos X al frente de batalla durante la Primera Guerra Mundial (1914-1918).

frente de batalla donde se los llamaba “pequeños Curie” (figura 7). Adquirir experiencia para hacer diagnósticos con rayos X no significó un esfuerzo tan grande para Maria como el que tuvo que dedicar para conseguir fondos, pelear contra la burocracia, conseguir equipos y vehículos, entrenar técnicos en el *Institut du Radium*, y a veces conducir ella misma los vehículos hasta el frente de batalla (en ocasiones acompañada de su hija Irène, de 18 años).

Gracias a su esfuerzo, las técnicas radiográficas, que se habían empleado poquísimas antes de 1914, llegaron a considerarse imprescindibles al final de la guerra; ningún cirujano quiso ya operar heridas de guerra sin conocer previamente el lugar preciso donde se encontraba el proyectil. Hacia el final de la guerra, Maria cumplió sus cincuenta años extenuada y sin dinero alguno, gastado todo en apoyar a Francia en la lucha armada.

El *Institut du Radium*

Pero su dedicación parecía no tener fin. En 1919 se instaló en el nuevo edificio del *Institut du Radium* (fundado en 1914) que se con-

virtió en el instituto de investigación más renombrado de Francia en los años previos a la Segunda Guerra Mundial. Su hija Irène, también física, ingresó al laboratorio de su madre como asistente. Dos años después publicó Maria su libro *La Radiologie et la guerre*, en el que cuenta en detalle el progreso de la radiología durante ese período.

Irène, junto con su esposo Frédéric Joliot, obtuvo en 1935 el premio Nobel de Química por la síntesis de nuevos elementos radioactivos. Sin embargo, este galardón no llegó a los oídos de Maria, quien murió de leucemia el 4 de julio de 1934.

Epílogo

Maria Sklodowska Curie fue una persona fuera de lo común. Nacida en una nación ocupada por una potencia extranjera, supo lograr con enorme esfuerzo y por sus propios méritos, en un lugar tan competitivo como la Francia de fines del siglo XIX, realizaciones pioneras y trascendentes que su condición de mujer realzan más todavía. Dejó extraordinarias contribuciones al progreso científico y humano. Su compromiso con las causas que abrazó no conoció límites.

Su indeclinable causa en defensa de los valores humanos y de la ciencia se refleja en unos conceptos que vertió en 1933 en un congreso sobre el “Futuro de la cultura”, donde varios panelistas criticaban a la ciencia por la deshumanización que había traído a la vida moderna. Maria objetó esa posición, diciendo: “Estoy entre los que piensan que la ciencia posee una gran belleza. Un investigador en su laboratorio no es solamente un técnico, también es un niño frente a fenómenos naturales que lo asombran cual si fueran relatos fantásticos. No deberíamos permitir que se consolidara la creencia de que todo el progreso científico se puede reducir a mecanismos, máquinas, engranajes, aun cuando tales instrumentos también tienen su belleza”.

Bibliografía

- Badash, L., “Marie Curie: In the Laboratory and on the Battlefield”, *Physics Today*, 56, 37 (2003).
- Coppes-Zantinga, A. R., y Coppes, M. J., “The Early Years of Radiation Protection: a Tribute to Madame Curie”, *Canadian Medical Association Journal*, 159, 1389 (1998).

- Curie, Sklodowska, *Recherches sur les substances radioactives*, Tesis de Doctor en Ciencias Físicas, Faculté des Sciences de Paris, Gauthier-Villard, Paris, 1903.
- Fröman, N., *Marie and Pierre Curie and the Discovery of Polonium and Radium*, Royal Swedish Academy of Sciences, Estocolmo, 1996.
- Ham, D., "Marie Sklodowska Curie: The Woman Who Opened The Nuclear Age", *21st Century Science and Technology Magazine*, 30, 69 (2003).
- Pasachoff, N., *Marie Curie and the Science of Radioactivity*, Oxford University Press, 1996.
- "The Nobel Prize in Physics 1903", *Nobel Foundation*, www.nobelprize.org.

LOS GRANDES DESCUBRIMIENTOS EN FÍSICA A FINES DEL SIGLO XIX

Prof. CARLOS D. GALLES

“¿Es Ud. Astrónomo? Arago está montando un telescopio que acercará la luna a seis leguas de París; i un tal Leverrier, que era ayer empleado en los ferrocarriles, anda persiguiendo en los espacios terrestres, i llamando a todos los astrónomos que se aposten en tales i cuales lugares que él señala, para cojerlo al vuelo a un planeta que el dice que hai en el cielo, porque debe haberlo por requerirlo así una demostración de las matemáticas”.

Así describía Sarmiento recién llegado en 1846 a París, y en carta a su amigo Antonino Aberastain, la sensación exitosa que se desprendía del descubrimiento de Neptuno por parte de Leverrier; aparentemente comprendido por muchos como si la posición del planeta hubiese surgido meramente del cálculo sin datos previos. No cabe duda que fue la apoteosis de la óptica, por la observación detallada del movimiento de Urano, y de la mecánica newtoniana en lo que hace a la estimación de la órbita. El mundo natural lucía como entendible y se podían hacer previsiones exitosas sobre él. Parecía marcharse por un camino regio donde solo cabía encontrar las explicaciones matemáticas ajustando los resultados con mejores mediciones. Esta idea perduró a lo largo de la centuria; tal es así que sobre el fin de la misma Lord Kelvin, uno de los fundadores de la moderna Termodinámica, un hombre además práctico con los aparatos experimentales y prodigioso en los manejos del cálculo, expresaba en la Asociación Británica para el Progreso de la Ciencia en 1900, lo siguiente:

“No hay nada nuevo a ser descubierto en la física ahora. Todo lo que resta es hacer más y más precisas mediciones”.

Newton, marchando, como él mismo dijo, a hombros de gigantes, había logrado unir en un solo gran esquema la ciencia que rige el mo-

vimiento de los cielos y la mecánica terrenal. Le habían bastado tres principios, una ley de gravitación universal, y el uso de una herramienta matemática, el cálculo infinitesimal, presagiado desde tiempos alejados pero que solo en el siglo XVIII se consubstanciaría. Luego una generación de matemáticos de genio empleó sus métodos, y otros nuevos, a la resolución de gran cantidad de cuestiones astronómicas, el caso del descubrimiento de Neptuno ha quedado como paradigmático, y a hechos menos majestuosos, como la tensión superficial de los líquidos por ejemplo, pero que requerían también de gran sutileza y pericia en el análisis.

Mientras tanto otros fenómenos encontraban explicación con teorías basadas en un sorprendentemente pequeño número de principios básicos, lo cual siempre genera en los científicos una sensación reconfortante, la de estar marchando sobre una senda bien elegida, en una manera semejante a la que tres siglos antes de nuestra era marcara Euclides al desarrollar la ciencia de la geometría partiendo de solo un puñado de postulados. Surgieron así la termodinámica y la teoría electromagnética; ambas dan cuenta de innumerables fenómenos que habían escapado a la descripción mecánica.

La termodinámica, la ciencia que trata sobre el intercambio de energía en los diversos procesos, quedó establecida sobre sólidos principios. La concepción ondulatoria de la luz, fundada por Young y Fresnel, definía un nuevo campo para la experimentación y los desarrollos matemáticos. La teoría electromagnética de Maxwell había logrado condensar en un grupo de ecuaciones conocimientos obtenidos a lo largo de una centuria, unificando los campos de la electricidad y el magnetismo, y determinando además con rigurosidad la existencia de fenómenos de naturaleza ondulatoria emergentes del movimiento de las cargas eléctricas. Hertz, quien buscaba en su laboratorio infirmar los resultados de Maxwell, pues era partidario de una teoría anterior, confirmó en una magnífica serie de experimentos entre 1886 y 1889 la existencia de ondas electromagnéticas.

Luego, a partir de 1895, se dio una sucesión de extraordinarios descubrimientos fundamentales: la existencia de rayos X, la sorprendente actividad radioactiva de varios elementos, el efecto Zeeman, la existencia del electrón, todos ellos dieron comienzo a la inquisitoria sobre la estructura ultramicroscópica de la materia. Estas situaciones experimentales no demasiado esperadas, que acechan en el laboratorio, se presentan según Thomas Kuhn cuando *instrumentos y conceptos se han desarrollado lo suficiente como para que se reconozca a la anomalía como tal al observarse la contradicción con las expectativas.*

Un instrumento fundamental en esta evolución conceptual que llevó a los sorprendentes descubrimientos es el tubo de descarga gaseosa, también llamado tubo de Crookes. Su aspecto no es nada intimidatorio, simplemente un tubo cerrado de vidrio dentro del cual se establece una diferencia de potencial entre dos electrodos. La línea investigativa se centró fundamentalmente en reducir la presión del gas dentro del tubo y en aumentar la diferencia de potencial entre los electrodos.

En el siglo XVIII ya se habían observado extrañas luminosidades al hacerse descargas eléctricas en recipientes evacuados parcialmente; pero estas observaciones no estaban bien encuadradas en una teoría y se presentaban meramente como curiosidades dignas de llamar la atención y ser comentadas. En 1838 Michael Faraday, fuerte de sus avances en la electrólisis, llevó a cabo una serie de experimentos sobre la conducción de la electricidad en gases, obteniendo una serie de muy interesantes resultados, en primer lugar determinó que al ir bajando la presión dentro del tubo aparecían espacios iluminados, también encontró un espacio oscuro dentro de la ampolla, que pasó a llevar su nombre. Había sin embargo un aspecto experimental que impedía la obtención de otros resultados nuevos y era la poca calidad de los vacíos obtenibles por entonces.

Desde que Otto von Guericke construyese hacia 1650 la primera bomba de vacío, que alcanzaba solo una presión de pocos centímetros de mercurio, la obtención de mejores vacíos había permanecido limitada por las dificultades técnicas en la implementación de las bombas mecánicas. Hawksbee logró en 1704 una bomba de dos cilindros alternativos que lograba bajar la presión a menos de dos milímetros de mercurio; recién hacia la mitad del siglo XIX se logró llegar a presiones inferiores al milímetro, siempre con bombas mecánicas. El gran salto tecnológico se dio con la invención de las bombas de mercurio; en 1855 un fabricante de instrumentos científicos de Bonn llamado Geissler construyó la primera bomba en la cual un chorro de mercurio era el encargado de lograr el vacío, obteniendo la décima de milímetro. De esta forma pudo construir recipientes tubulares de vidrio, los llamados “tubos de Geissler”, que encerraban un alto vacío dentro de ellos del orden de la décima de milímetro. Con el mismo procedimiento Crookes obtuvo en 1876 menos de la centésima; Edison, motivado por sus investigaciones en lámparas eléctricas incandescentes, lograba en 1879 la milésima. Sobre el final de la centuria Kahlbaum alcanzaba en 1894 la cienmilésima de milímetro.

Este progreso técnico fue aprovechado por los físicos experimentales y ya en 1858 Plücker señaló que la luminosidad presente en el tubo al ser sometido a una descarga eléctrica era desviada por la presencia de un campo magnético y además que un fenómeno de fluorescencia se presentaba en las paredes de vidrio del tubo cercanas al cátodo. Estas investigaciones fueron retomadas por Hittorf en 1869 quien observó que un obstáculo material dentro del tubo proyectaba una sombra sobre la región del cátodo. Pronto demostró que la luminosidad estaba determinada por el cátodo y surgía de su superficie como rayos rectilíneos.

Hacia 1878 el inglés Crookes se sumó a estas investigaciones, que habían sido terreno propio de los científicos alemanes hasta entonces. Mejorando los métodos logró, como hemos visto, presiones cercanas a la cienmilésima de atmósfera. Crookes había desarrollado poco tiempo atrás una famosa invención, el radiómetro, también conocido con el atractivo nombre de “molino de luz”, el cual los que fueron niños hace un medio siglo recordarán dejaba boquiabiertos a los paseantes al verlo en las vitrinas de los negocios. En él las aspas del molino, pintadas de negro en uno de sus lados, se movían al ser iluminadas. Seguramente representó un buen y perdurable suceso financiero para los fabricantes de instrumental científico. Aunque Crookes tuvo que desechar su explicación inicial, en la que suponía que las aspas se movían por la diferencia de presión de la luz sobre las caras brillantes y las ennegrecidas, su invento le sirvió para comprobar algunas predicciones de la teoría cinética de los gases de Maxwell.

En un principio Crookes experimentó con un tubo de descarga dentro del cual colocó molinillos de diverso tipo. Sucesivas experiencias lo llevaron a determinar el largo del espacio oscuro que lleva su nombre en función de la presión interior al tubo. Observó además los fenómenos de fluorescencia que se presentan en ciertos minerales insertos dentro del tubo. Tanto él como otros experimentadores midieron el potencial eléctrico a lo largo del tubo para diferentes voltajes en los electrodos y diferentes presiones.

Los tubos de descarga al vacío pasaron a ser conocidos como “Tubos de Crookes” y fueron un elemento indispensable en los laboratorios de física de todo el mundo. Se construyeron en las más diversas formas, uno de ellos, el llamado “huevo eléctrico”, fue un ejemplo de los más divulgados de lo que se puede llamar física recreativa.

Crookes observó que objetos colocados en el paso de los rayos catódicos proyectaban su sombra sobre la pared del tubo. Para esta

demostración se construyó, conjeturamos que en vidrierías alemanas, el tubo con una cruz de malta reversible, que brinda una demostración todavía usada en nuestros días. También observó que los rayos eran desviados en su trayectoria ante la presencia de un campo magnético.

Crookes era sin dudas un imaginativo científico, como el incompleto esbozo que se ha hecho de algunas de sus investigaciones da prueba, y al considerar la esencia de los misteriosos rayos consideró que se había logrado a atisbar un “cuarto estado de la materia”: los rayos catódicos estaban formados por partículas. Pero existía otra interpretación de los fenómenos muy opuesta a la de Crookes. La luminosidad dentro del tubo era vista por la escuela alemana como un ejemplo de fenómenos de excitación del éter. La influencia de estas concepciones contrastantes fue determinante en la marcha de las investigaciones.

Visto desde la actualidad resulta un tanto intrigante esta divergencia de opiniones en cuanto a la explicación de los rayos catódicos pues algunos de los efectos que hemos indicado sucintamente parecen dar clara evidencia del carácter corpuscular. Pero existían otros hechos experimentales que daban pie a la explicación ondulatoria, en primer lugar que los rayos catódicos parecían indiferentes a la presencia de campos eléctricos dentro del tubo, hecho probado experimentalmente por Hertz en 1883, cuando trabajaba, en los inicios de su carrera, en el laboratorio de Eugen Goldstein, quien bautizara a la radiación con el nombre de *rayos catódicos*. Luego, más de diez años después, se comprobaría que esta conclusión de Hertz estaba basada en una endeble base experimental.

Esta idea se veía apoyada además por la confirmación de la existencia de ondas electromagnéticas, previstas teóricamente por Maxwell y comprobadas en el laboratorio por Hertz. La existencia de esas ondas hacía necesario un medio donde se propagaran, el denominado éter, y la tentación de asignarle el fenómeno de los rayos catódicos en la forma de un fenómeno ondulatorio era grande y con sólida base lógica. La desviación de los rayos por los campos magnéticos era explicada con una analogía con la rotación magnética del plano de polarización de la luz. Lo que en Inglaterra se pensaba como corpúsculos era visto en Alemania como un estado especial del éter.

El propio Hertz demostró en 1892, en la que fuera su última gran contribución experimental, que los rayos catódicos podían atravesar una fina lámina de metal. Esto llevó a su discípulo Lenard a construir

las ventanas en los tubos que llevan su nombre; finas membranas metálicas colocadas en las paredes del tubo substituyendo al vidrio daban paso a los rayos fuera del tubo, lo cual permitía muchas experiencias que hubiesen sido engorrosas de realizar dentro del tubo. La teoría continental quedaba fuertemente apoyada por estas experiencias, pues era difícil de imaginar como, de ser de naturaleza corpuscular, vale decir de una índole molecular, los rayos catódicos pudiesen atravesar el espesor de las ventanillas, que si bien finamente laminares eran capaces de sostener las grandes fuerzas provenientes de la diferencia entre la presión atmosférica y el vacío interno del tubo. El rol innovador de las experiencias de Lenard fue decisivo para el avance de las investigaciones, y por ello le fue otorgado el premio Nobel en 1905, sin embargo los grandes descubrimientos del fin de siglo le fueron esquivos como se verá a continuación.

El desarrollo de los tubos de vacío continuó hasta la actualidad, con sucesivas innovaciones y múltiples aplicaciones, citemos por ejemplo el osciloscopio inventado por Karl Ferdinand Braum en 1897, el microscopio electrónico inventado por Ernest Ruska en 1928, para no hablar de los tubos usados en los aparatos receptores de televisión, uno o más en cada hogar para regocijo de quienes se entretienen en muda contemplación de las alegrías de un mundo feliz.

Wilhelm Conrad Roentgen nació en Renania en 1845. Su carrera universitaria no comenzó en una forma muy promisoría y pasó por algunos altibajos. Sin embargo con el correr del tiempo logró establecerse como un científico de un cierto renombre, realizando interesantes investigaciones en electricidad, por medio de las cuales y la reputación alcanzada logró alcanzar el cargo de profesor en Würzburg en 1888. Hacia fines de 1895, Roentgen decidió emplear parte de su tiempo en encarar una investigación sobre los rayos catódicos siguiendo la línea experimental marcada por Hertz y Lenard. Apparentemente trataba de estudiar la acción fotoquímica de los rayos una vez salidos del tubo.

No se debe pensar en Roentgen solo como un sencillo y rutinario experimentador. Él mismo en uno de sus escritos brinda una clara idea de la división que por entonces empezaba a marcarse entre los científicos:

A mi modo de ver, hay dos métodos para hacer investigaciones, con aparatos o haciendo cálculos. Quien prefiera el primer método es un experimentador; el otro es un físico matemático. Ambos necesitan de teorías e hipótesis.

Vale decir, quien meramente prosiga pasos de laboratorio sin basarse en hipótesis bien asimiladas puede llegar a ser un buen técnico pero no aspirar a distinguir nuevos resultados, quien se limite a los desarrollos matemáticos se encontrará perdido entre sus fórmulas al faltarle el asidero de la comprensión conceptual y teórica. Ambos pueden solo aspirar, en el mejor de los casos, a ser instrumentos de quien elabora y entiende las hipótesis y las teorías.

Roentgen estaba sumamente interesado en la relación entre la luz y la electricidad, lo prueban sus exitosos estudios con su maestro Kundt sobre la rotación del plano de polarización y la prueba experimental de la existencia de un campo magnético en la vecindad de un dieléctrico polarizado en movimiento. Es posible también que la búsqueda de una oscilación longitudinal del éter, sugerida por Helmholtz, lo haya llevado a trabajar con los rayos catódicos.

Los hechos que llevaron al descubrimiento de los rayos X son bien conocidos y han sido narrados ininidad de veces. Roentgen decidió concentrarse en la prosecución de experimentos con un tubo de rayos catódicos cubierto con cartulina negra para evitar efectos luminosos espurios, fue entonces cuando en la oscuridad total de su laboratorio advirtió una no esperada luminosidad en una pantalla pintada con platinocianuro de bario colocada a una buena distancia del tubo. Vinieron entonces varias semanas de febriles experimentos, realizados en el mayor de los secretos, en los que el nuevo efecto fue estudiado de innumerables maneras; la primera comunicación oficial de la existencia de los rayos X fue hecha el 28 de diciembre ante la Academia de Medicina de Würzburg.

La noticia de las maravillosas posibilidades de los nuevos rayos, en especial la propiedad de ver el interior de los cuerpos humanos, se extendió pronto a todo el mundo y la experiencia, en rigor de fácil realización, fue repetida en innumerables laboratorios. Muy pronto, en enero de 1896, Roentgen era invitado a Potsdam para presentar sus experimentos frente al Emperador de Alemania. Le sería luego atribuido el primer premio Nobel en 1901.

Cabe aquí una reflexión, si el Kaiser o el ministro que regía las universidades, le hubiese pedido a Roentgen que diseñase algún método para localizar las fracturas de huesos, es difícil de imaginar que el profesor de Würzburg lo hubiese buscado ensayando con los sutiles rayos catódicos. Es que hay un aspecto en la investigación científica en el que lo inesperado surge, y esta emergencia no es fatalmente causa de pesadumbre, como afirma Thomas Kuhn al tratar las anomalías, sino que en muchos casos es la lámpara que ilumina la escena

de la búsqueda y permite concretar una visión totalizadora. Además, del descubrimiento pueden deducirse aplicaciones tecnológicas insospechadas previamente.

La noticia se expandió rápidamente y la experiencia fue reproducida en infinidad de laboratorios. Cabe acotar que los Rayos X, tal la denominación que les dio Roentgen al no poder precisar su naturaleza, ya se habían mostrado anteriormente en los laboratorios. En 1879 Crookes había encontrado veladas algunas de sus placas, ubicadas en las inmediaciones de la mesa donde hacía sus variados experimentos con tubos de rayos catódicos, siendo su reacción presentar una queja al proveedor por la baja calidad de los productos. Lenard mismo utilizaba placas fotográficas en sus experiencias y por supuesto estuvo cerca de descubrir la nueva radiación. Tal vez es con cierta ironía que Roentgen comenta en una de sus pocas publicaciones sobre los rayos X que es aconsejable no tener placas fotográficas en el recinto donde se hacen los experimentos.

Ante la pregunta de un periodista norteamericano que le inquiría qué había pensado al descubrir el efecto, la respuesta de Roentgen fue: “No pensé nada, experimenté”. Esta corta frase, que ha sido repetida hasta el cansancio, pareciera indicar que la experimentación es un procedimiento mecanizado en el que la mente del científico no tiene un rol de importancia. Este es un grave error epistemológico, una verdadera barrera al conocimiento; también un refugio-excusa a la falta de pensamiento creativo. Es el científico quien se formula preguntas, quien tiene dudas sobre los efectos observados, quien debe someter los conceptos teóricos a situaciones experimentales diferentes para ver qué resultados se obtienen; para arribar a los nuevos resultados experimentales debe forzosamente pensar además de actuar. Es posible que la respuesta de Roentgen deba interpretarse como un eco de la famosa afirmación de Newton en sus Principia, *hypothesis non fingo*, en el sentido que no hizo conjeturas sobre la esencia de los nuevos rayos hasta no haberlos sometido a un prolijo examen.

Vale decir que a principio de 1896 se tenían dos radiaciones, los rayos catódicos y los rayos X, las cuales estaban estudiadas en profundidad en muchos de sus efectos pero sobre cuya naturaleza no se había conseguido un acuerdo. El momento de alcanzar una descripción completa estaba sin embargo próximo para los rayos catódicos. En cuanto a los rayos X sólo en la segunda década del siglo siguiente se lograría confirmar su esencia electromagnética.

Un inglés, Joseph John Thomson, se había destacado, tras graduarse en Cambridge, como un eximio teórico en el desarrollo de la

teoría electromagnética de Maxwell, aunque en un principio con limitada frecuentación del laboratorio. Aun así fue elegido para suceder a Lord Rayleigh en 1884 como titular de la cátedra Cavendish de Física Experimental.

Como se ha mencionado los rayos catódicos provocaban luminiscencia al impactar contra el vidrio de las paredes de los tubos, por analogía este efecto los vinculaba con la luz ultravioleta que causa efectos similares. Como jefe de laboratorio Thomson decidió dedicar sus investigaciones experimentales a las descargas eléctricas en gases y estudiar el fenómeno de los rayos catódicos. La noticia del descubrimiento de los Rayos X le llevó a desarrollar un programa experimental que intentase elucidar definitivamente la naturaleza de los rayos catódicos. Por supuesto tropezó con un rival de otra formación en Lenard, a quien invitó a disertar en la British Association en 1896. Las hipótesis se sucedieron en la mente de Thomson acerca de la verdadera naturaleza de los rayos. Fue entonces cuando diseñó en 1897 la célebre experiencia que le permitió medir el cociente entre la carga y la masa de los corpúsculos, obteniendo un número inesperadamente grande, y que por lo tanto indicaba para los corpúsculos una masa mucho menor que la del átomo de hidrógeno, y hacía entonces presumir unas dimensiones pequeñas, lo cual explicaba por la sutileza del electrón muchos de los efectos encontrados anteriormente, en especial los llevados a cabo por Lenard. Thomson en su experiencia había logrado desviar las partículas con campos eléctricos, contradiciendo los resultados de Hertz gracias al uso de vacíos más altos. Señalemos que precedentemente el francés Jean Perrin había mostrado experimentalmente que los rayos catódicos son portadores de carga eléctrica.

Thomson había entonces encontrado la prueba de la existencia de una partícula pequeña, que pasó luego a ser llamada universalmente con el nombre de electrón, que cuantificaba la electricidad. Fue este un golpe decisivo a la idea continental de la “perturbación del éter”, el cuarto estado de la materia de Crookes se revelaba conformado por electrones.

Por supuesto los rayos X también fueron estudiados por los científicos franceses. Auspiciado por el gran matemático Henri Poincaré ya el 20 de febrero de 1896 se comunicaba a la *Académie des Sciences* un primer trabajo, consistente simplemente en la presentación de una radiografía. Poincaré se interesó por los nuevos rayos fijando su atención en un aspecto de su producción: Roentgen había indicado que los nuevos rayos parecían tener su punto de formación en la zona

donde los rayos catódicos incidían sobre la pared del tubo de vidrio tornándola fluorescente. Esto lo llevó a sugerir la hipótesis de que quizás algunas sustancias fluorescentes pudiesen también emitir rayos X, aun sin ser impactadas por rayos catódicos. Pronto varios científicos franceses pusieron a prueba la sugerencia y varias comunicaciones en el mes de febrero señalaban contrastaciones afirmativas; placas fotográficas encerradas en compartimentos opacos colocados a la luz solar en presencia de materiales fluorescentes mostraban manchas al ser reveladas.

El mecanismo de la explicación de este fenómeno era el siguiente: la luz solar excita la fluorescencia de ciertos compuestos y éstos simultáneamente emiten radiaciones lo suficientemente penetrantes como para ser registradas por los cristales de las placas fotográficas a pesar de estar blindadas. En realidad estos experimentos no pudieron ser reproducidos pues adolecían de graves defectos en el método experimental; las sustancias utilizadas, sulfato de zinc por ejemplo, son fluorescentes ante la luz solar pero no emiten radiaciones penetrantes.

Entre quienes trataron de confirmar la hipótesis de Poincaré se encontraba Henri Becquerel. Nacido en 1852, era hijo y nieto de importantes científicos, miembros de la Academia de Ciencias y directores sucesivamente del Museo de Historia Natural. Graduado en la Escuela Politécnica terminó sus estudios en la École Nationale des Ponts et Chaussées; luego, en forma que aparece muy natural, heredó las cátedras de su padre en el Museo. La familia Becquerel, por otra parte, se había interesado durante esas tres generaciones en el estudio de las sustancias fosforescentes.

El método empleado por Becquerel era similar al ensayado por otros investigadores, consistía en colocar expuestas a la luz solar placas fotográficas cuidadosamente envueltas en papel opaco a la luz natural y sobre ellas láminas de sulfato de uranio y de potasio. El azar, encarnado en el gris cielo plomizo del invierno parisino, favoreció sin dudas a Becquerel. Desprovisto de una buena insolación decidió postergar por unos días sus experiencias y guardó en cajones cercanos de su escritorio las placas fotográficas y los compuestos de uranio. Por una causa que no consignó el domingo 1 de marzo de 1896 decidió revelar las placas y se encontró con que aparecían manchas sobre la superficie fotográfica. Este hecho no iba en favor de la hipótesis lanzada por Poincaré, pues las sales de uranio no habían sido excitadas hasta la fluorescencia, el hecho nuevo era que sin necesidad de radiación solar emitían radiaciones penetrantes. Claro

está que el valor de una conjetura reside también en que las investigaciones con las cuales se trata de confirmarla o refutarla pueden conducir a nuevos resultados positivos novedosos, aunque la hipótesis en sí misma deba terminar al cabo por ser rechazada.

Tal vez pocas veces un experimento científico tan importante, como el de Becquerel, haya sido tan falto de dramatismo. Sus detalles estéticos son parcos: apenas unas manchas sobre un papel fotográfico, es completamente estático, nada se mueve salvo lo imponderable a los ojos, y carece de todo tipo de implementación propia de un laboratorio, no se tienen presentes ni corrientes eléctricas de alto voltaje, ni bobinas para generar altos voltajes, ni condensadores, ni bombas de vacío; tampoco necesita de la precisión en las mediciones, el experimento es en sus primeras versiones meramente cualitativo.

Muy pronto Becquerel, haciendo amplio uso de las colecciones mineralógicas del museo, comprobaría que era específicamente el uranio el causante de la nueva radiación. Innovando en la medición de las radiaciones decidió además usar electrómetros para medir el efecto de ionización. Ya en ese año de 1896 comenzó a llamar al efecto que había descubierto como el fruto de la acción de los *rayos uraníficos*; en su mente la nueva radiación había pasado a ser algo proveniente del elemento uranio y no un fenómeno asociado a la fosforescencia. Luego, cuando los Curie mostraron que los rayos no eran privativos del uranio, pasaron a ser llamados, por un tiempo, *radiación Becquerel*.

Durante dos años Becquerel prosiguió estos estudios casi en soledad; la comunidad de los físicos solo veían en la radiación emitida por el uranio una manifestación más de los rayos X, actitud bien comprensible sin dudas; algunos autores comentaban sin embargo el hecho singular de la persistencia de la radiación a lo largo de los meses.

En 1898 comenzaron a interesarse por la nueva radiación los Curie en París y Rutherford en Cambridge. Pierre y Marie Curie definirían el campo de la *radioactividad*, así bautizado por ellos tras descubrir un nuevo elemento, el radium, mucho más activo que el uranio¹. Las “radiaciones invisibles” de Becquerel habían definido un nuevo amplio espacio para la investigación científica, del que surgirían fabulosos hallazgos: el sueño de los alquimistas de la transmutación de los elementos hecho realidad, la visualización del núcleo de los átomos, el descubrimiento del neutrón, es decir la física nuclear,

¹ Sobre los primeros desarrollos de la radioactividad ver el artículo del Prof. Dr. Roberto Mercader en este mismo fascículo.

delicado dominio donde alternan beneficios y peligros para la humanidad.

Es indudable que las nuevas teorías surgen y se desarrollan *forzando a la mente a abandonar los símbolos por los objetos y luego los objetos por los símbolos*, como fuera afirmado por Maxwell en su famosa conferencia inaugural de la cátedra Cavendish en Cambridge. En este juego reflexivo, entre hechos y conceptos, el tubo de rayos catódicos tuvo un rol fundamental durante el medio siglo que va desde los primeros experimentos de Faraday hasta la tenaz labor de los Curie.

Bibliografía

- Badash, Lawrence, "The discovery of radioactivity", *Physics Today*, February 1996.
- Barbo, Loïc, *Pierre Curie. Le rêve scientifique*, Belin, 1999.
- Bunge, Mario (ed.), *Rutherford and Physics at the Turn of the Century*, William Shea, Dawson, 1979.
- Dampier Whetham, William Cecil, *Cambridge readings in the literature of science*, Cambridge, 1924.
- Hoffmann, Dieter; Fabio Bevilacqua, Roger Stuewer (eds.), *The Emergence of Modern Physics*, Università degli Studi di Pavia, 1996.
- Mulligan, Joseph F. (ed.), *Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), A collection of Articles and Addresses*, Garland Publishing, 1994.
- Papp, Desiderio, *Röntgen, el descubridor de los rayos X*, Emecé, 1945.
- Segrè, Emilio, *Personaggi e scoperte nella fisica contemporanea*, Mondadori, 1976.

Artículos sobre esta temática en el *Dictionary of Scientific Biography*, a cargo de Charles Gillispie, Charles Scribner and Sons, 1979-1980.

Se recomienda la visita del sitio de Internet <http://www.sciencemuseum.org.uk/>, y por supuesto la búsqueda con palabras clave en el mismo medio.

Universidad Nacional de Rosario
Universidad Tecnológica Nacional
galles@fceia.unr.edu.ar

RADIACIONES Y REGULACIÓN

(de las radiaciones ionizantes de origen nuclear)

Ing. JUAN CARLOS FERRERI¹

Resumen

Se explicitan algunos aspectos de contexto del accionar regulatorio asociado con el uso de las Radiaciones Ionizantes de origen nuclear (RI). Se muestran cuales son las consideraciones de tipo sociológico que permiten enmarcar la actividad de un regulador, se intenta una definición del mismo y se discute cual es el rol de la precaución en su accionar. Se introduce además una definición abarcadora en la consideración de la naturaleza humana y la naturaleza física (es decir la naturaleza) al efecto de su protección con respecto a las RI, al tiempo que se define el marco ético adecuado para su consideración.

I. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se considerarán aspectos asociados a la regulación de las prácticas que involucran las RI, dejando constancia que solamente se consideran las de origen nuclear y producto de la actividad en esa área particular de la Ciencia, la Ingeniería y la Tecnología². Se hará referencia a las RI originadas en la actividad nuclear, pues las RI de origen natural están excluidas del accionar regulatorio del cual participa el Autor en la Autoridad Regulatoria Nuclear³

¹ Miembro de la CICyT del CONICET

² Quedan, de esa manera, excluidas las originadas en las prácticas que utilizan rayos X.

³ <http://www.arn.gov.ar> La ARN fue creada mediante la Ley N° 24.804 (Ley Nacional de la Actividad Nuclear), promulgada el 25 de abril de 1997, como entidad autárquica en jurisdicción de la Presidencia de la Nación y tiene la función de regular y fiscalizar la actividad nuclear en todo lo referente a los temas de seguridad radiológica y nuclear, protección física y no-proliferación nuclear. Dicha ley fue reglamentada por el Decreto 1390/98. La ARN debe asimismo asesorar al Poder Eje-

(ARN). No obstante debe enfatizarse que los efectos de las RI son indiferentes a su origen.

En la Argentina, la actividad de regulación de las actividades que generan RI de origen nuclear es temprana y se debió a la iniciativa del Ing. Celso C. Papadopulos, quien desde la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) redactó el texto del decreto 842/58, que estableció el Reglamento para el Uso de Radioisótopos y Radiaciones Ionizantes. Este Reglamento complementó la ley de creación de la CNEA, estableciendo las condiciones para un sistema de permisos, los servicios de inspección y las tareas a realizar para la Protección Radiológica (PR), entre otros aspectos.

En los apartados que siguen se discutirán con alguna profundidad las maneras de ver la naturaleza y los aspectos éticos asociados con la regulación de las RI. Estos últimos están directamente vinculados al paradigma que se adopte para la PR. Ello surge de tener en cuenta que, dado que es aceptada la hipótesis de linealidad entre probabilidad de daño estocástico y radiación a muy bajas dosis, no se pueden obtener beneficios sin incurrir en daños (al menos en términos aleatorios). Por ejemplo, y en un extremo, un paradigma sería proteger al individuo sin tener en cuenta la sociedad globalmente; esta es una posición típicamente deontológica. En el extremo opuesto estaría el paradigma de proteger globalmente a la sociedad sin tener en cuenta al individuo, lo que llevaría a adoptar una posición ética utilitaria. Al respecto se propondrá una posición integradora alternativa.

cutivo Nacional en las materias de su competencia. Ello se realiza para la protección de las personas y del medio ambiente (i.e. de la naturaleza) de los efectos nocivos de las RI. Así, la ARN es la autoridad de aplicación de las regulaciones para la actividad nuclear y genera la normativa pertinente. La ARN regula y controla la seguridad radiológica y nuclear de las instalaciones que generan RI, otorga las licencias correspondientes, licencia al personal que las opera, inspecciona el cumplimiento de la normativa, posee laboratorios propios especializados para realizar determinaciones de radionucleidos, regula y controla el transporte de material radiactivo, incluyendo la de los residuos radioactivos, la seguridad física, las salvaguardias y la no-proliferación para el uso pacífico de la energía nuclear y participa activamente en foros internacionales, siempre en lo referido a las RI de origen nuclear. La ARN debe evaluar el impacto radiológico ambiental de toda actividad que licencie, realizando para ello actividades de monitoreo, estudio y seguimiento de la incidencia, evolución o posibilidad de daño ambiental que pueda provenir de dicha actividad. Este accionar está relacionado exclusivamente con la evaluación de los estudios y análisis realizados por los licenciatarios y la intervención de la ARN en lo que al medio ambiente se refiere, se limita al impacto ambiental radiológico que pueda provenir de la descarga de efluentes radiactivos.

Por otra parte, es conveniente también explicitar desde el comienzo que una institución reguladora (como la ARN) no establece que la introducción de una práctica que genera RI está justificada. En efecto, es el estamento político del Gobierno Nacional el que lo hace, basándose en aspectos políticos, económicos y sociales. La ARN debe, en función de las incumbencias que la ley le asigna, evaluar las consecuencias de la práctica y, de concluir que la misma no cumple con la normativa desde el punto de vista de la seguridad radiológica, no otorgar las licencias correspondientes. Con todo, es natural esperar que el poder político consulte a la ARN en los aspectos de su incumbencia previamente a la introducción de una nueva práctica.

II. ASPECTOS DE CONTEXTO EN LA REGULACIÓN DE LAS RI

Para el accionar regulatorio es esencial establecer un marco normativo. Esto no puede hacerse arbitrariamente, sino que debe tener una fundamentación técnica sólida y ser, además, aceptable socialmente. Este último aspecto, hace necesario definir una visión de la naturaleza en la que la mayoría del público verifique que la ARN es sensible a las cuestiones referidas a la salud de las personas y al cuidado del medio ambiente aun cuando, siendo una institución, sea impersonal en esencia. Para ello es necesario hacer explícita (y adoptar) una visión de la naturaleza y del comportamiento social del personal de la ARN en acuerdo con la esencia del control regulatorio y que, a su vez, respete los intereses de las personas y del medio ambiente, motivos de su accionar. Esto nos lleva a considerar el siguiente apartado.

II.1 Las personas, el medio ambiente y su relación

Para hacer explícita una visión del medio ambiente⁴ y de la forma en que los individuos se posicionan frente a él, es necesario considerar aspectos propios de las ciencias sociales. En particular, los aspectos sociológicos de la gestión del riesgo están fuertemente vinculados con la comunicación del mismo, toda vez que involucran la percepción del público. Si bien es posible reseñar la inmensa bi-

⁴ Conviene aclarar que cuando se hace referencia al “medio ambiente” se considera el “hábitat” que, por definición, es el “Lugar de condiciones apropiadas para que viva un organismo, especie o comunidad animal o vegetal”, definición del *Diccionario de la Real Academia Española*, 2008 (D-RAE/08).

biografía relacionada, por conveniencia y claridad consideraremos como base el análisis de Adams [1].

Sin embargo, es necesario introducir aquí una consideración que es esencial para el análisis que sigue. Podría parecer que el concepto de “naturaleza” que consideraremos está referido solamente al medio ambiente, es decir “todo” menos las personas. Esa es también la acepción que parece surgir del análisis que Adams [1] implica en su presentación. Sin embargo ello no sería así⁵, a pesar de algunas ambigüedades. Si se analiza el origen de este análisis, es prudente considerar que en su versión inicial, debida a Holling [2] y ampliada en [3], esta clasificación está referida al medio ambiente. En el trabajo de Grendstad y Per Selle [4], se hace una clasificación no ambigua, diferenciando entre “naturaleza humana” (NH) y “naturaleza física” (NF), sobre la que volveremos al discutir el marco ético de la Protección Radiológica (PR). Cuando se haga referencia al medio ambiente, éste será denominado “naturaleza física”.

En este trabajo, la consideración de la “naturaleza”⁶ incluye el todo, y por ello, también a las personas. Es importante tener en cuenta que esta manera de considerar a las personas implica que las cuestiones de la moral imperante, las del legado de las consecuencias de la actividad nuclear y de la justificación ética del uso de las RI quedan incluidas dentro un solo marco de referencia. Por otra parte, debido a considerar a las personas como integrantes de la naturaleza, son las propias personas –ahora parte del sistema– las que definen las “ofensas” y su aceptabilidad. Se entenderá como “ofensas” a las consecuencias negativas de la actividad de las personas sobre ellas mismas y el medio ambiente (de ahora en más, cuando corresponda, diremos “la naturaleza”). La inclusión de las personas y del medio ambiente en el concepto de naturaleza plantea ciertas ventajas y también dificultades. En particular, se puede decir que se torna más difícil introducir las ofensas en manera consistente con la ética si se acepta que todos los seres humanos tienen los mismos derechos, independientemente de etnias, política, religión, condición económica, etc. El delicado balance entre los costos y los beneficios de una práctica queda limitado (en su concepción utilitaria) por los preceptos de la moral (imperante) cuando se opta por el buen vivir, e.g. de la ética de la virtud. Lo mismo ocurre con el alcance social de

⁵ “I see ‘nature’ as very much embracing human nature as well as the physical environment”, J. Adams, Comunicación Privada, 6/3/2008.

⁶ D-RAE/08: Naturaleza: 2. f. Conjunto de todo lo que existe y que está determinado y armonizado en sus propias leyes

la PR. Los conceptos sobre límites, que veremos más adelante, serán ahora particularidades de un sistema unificado.

En [1] se resumen las formas de ver la NF sobre la base de su reacción ante las consecuencias de la actividad humana. Esa manera de definirla implica el análisis de su reacción ante perturbaciones, basado en la estabilidad de la respuesta. La Figura 1, adaptada a partir de [1], resume las cuatro visiones generalmente aceptadas de la NF, denominadas “visiones míticas”. Debe entenderse que en las abscisas de cada gráfico se representa, en escala arbitraria, una medida de la perturbación impuesta a la NF por una práctica dada, por ejemplo las consecuencias de la irradiación originada en una práctica con radionucleidos. En las ordenadas está representada la respuesta o la manera de comportamiento de la NF, medida por el desplazamiento de una bola. En esta forma conceptual, la magnitud de la perturbación introducida generará una respuesta diferente según sea la forma de respuesta de la NF en función de la visión aceptada. Nótese que el modelo es de carácter subjetivo y está, entonces, definido por nuestra percepción.

La Figura 1 no solamente resume las cuatro acepciones básicas, sino que define cual es la manera adecuada de gestión del riesgo en cada caso. Dichas acepciones pueden resumirse como sigue:

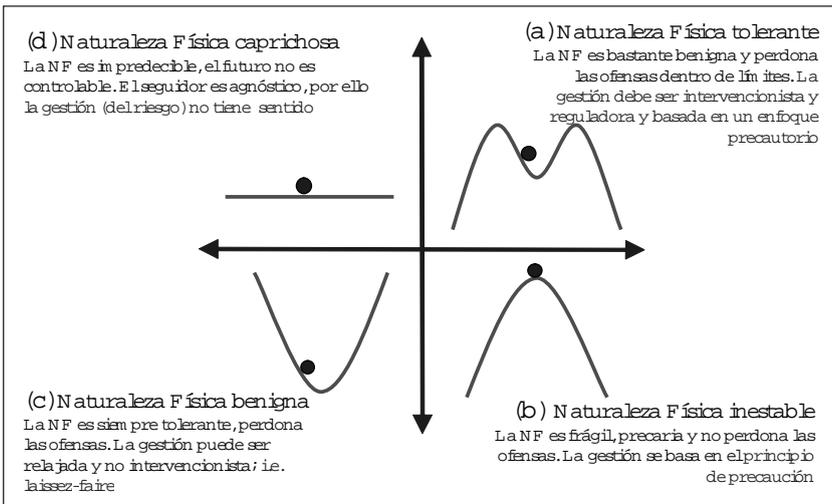


Figura 1. Las “visiones míticas” de la naturaleza física [1]

- a) NF tolerante: la NF es bastante benigna y perdona las ofensas dentro de límites. La gestión debe ser intervencionista y reguladora y basada en un enfoque precautorio, que será definido más adelante.
- b) NF inestable: la NF es frágil, precaria y no perdona las ofensas. La gestión se basa en el principio de precaución, que también veremos más adelante.
- c) NF siempre tolerante o benigna: perdona las ofensas sin importar su magnitud. La gestión puede ser relajada y no intervencionista, i.e. *laissez-faire*.
- d) NF caprichosa: la naturaleza es impredecible, es decir que el futuro no es controlable. El seguidor es típicamente agnóstico, por ello la gestión (del riesgo) no tiene sentido.

Es interesante notar que las definiciones anteriores son subjetivas y dependientes del tipo de observador. Es entonces necesario definir los filtros subjetivos con los que las personas nos observamos. Por ello hay también visiones míticas, esta vez de la naturaleza de las personas. Las correspondientes a la NH aceptadas usualmente son:

- a) El jerarquista, que habita un mundo con límites rígidos y prescripciones vinculantes. Las relaciones sociales son jerárquicas y cada uno conoce su lugar. Tiende a ser técnicamente racionalista y considera limitada la utilidad de las opiniones de las personas que afecta con sus decisiones si no pertenecen al círculo de su confianza⁷ técnica. Esta categoría de personas tiende a las reuniones cerradas y se aferra al razonamiento para emitir su opinión. La comunicación del estado de una deliberación que puede ser motivo de cambio es resistida fuertemente y, de producirse, genera fuertes tensiones grupales. Una situación típica de conflicto es la liberación oficiosa de información preliminar no consensuada. Otro caso típico puede ser la liberación anticipada de información consensuada grupalmente pero no acordada con la Dirección.
- c) El igualitarista, que es un individuo que tiene fuertes lazos sociales y no cree en imposiciones. Esencialmente no delega su confianza. Las decisiones se toman en forma democrática. Dirigen por la fuerza de su personalidad y por la persuasión. Es difícil que acepte

⁷ De la referencia [6] **Trust**: When we say we trust someone or that someone is trustworthy, we implicitly mean that the subjective probability that he will perform an action that is beneficial or at least not detrimental to us is high enough for us to consider engaging in some form of cooperation with him; **Subjective Probability**: is the measure of the personal judgment of an individual regarding how possible is the occurrence of a particular event.

- un criterio utilitario o que considere aceptable un riesgo si sus consecuencias no están distribuidas por igual.
- c) El individualista, que es un individuo emprendedor, “self-made”, relativamente libre del control de otros y que trata de ejercer control sobre otros y sobre el ambiente. Parecería que el utilitarismo es una condición natural para su accionar.
 - d) El fatalista, que es un individuo con mínimo control sobre su vida. Es marginal, intocable y resignado a su destino y no tiene interés en tratar de cambiarlo. En general a nadie le importa mucho su opinión.

De lo visto, resulta casi evidente que *la posición ante la sociedad y ante sí mismo de un miembro de una entidad reguladora está generalmente alineada con la visión de un individuo jerarquista*. Es la posición típica de los funcionarios públicos. Ello no excluye al público, que tiene generalmente una actitud similar en tanto que la administración goce de su confianza.

Es razonable [1,5] asociar las dos acepciones míticas consideradas en una sola estructura formal, es decir:

NH fatalista	↔	NF caprichosa
NH jerarquista	↔	NF tolerante
NH individualista	↔	NF benigna
NH igualitarista	↔	NF inestable
Tabla 1. La asociación de las visiones míticas de la NF y la NH		

Tabla 1. La asociación de las visiones míticas de la NF y la NH

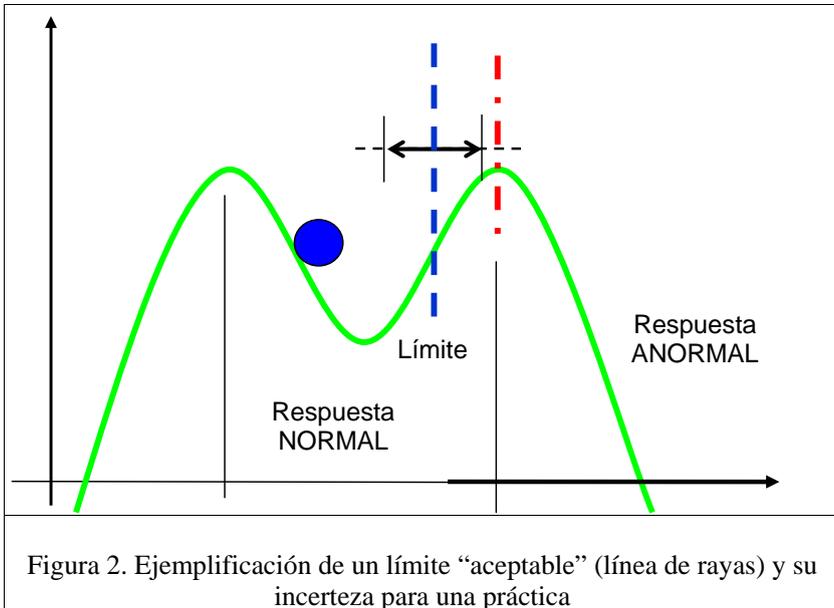
En el contexto de la regulación surge entonces como natural la coincidencia conceptual de la actitud de un individuo jerarquista y la visión de la naturaleza parcialmente tolerante. Nótese que, en este marco conceptual, este individuo adopta esa posición para tomar decisiones que también lo afectan, pero para que este análisis sea coherente, debemos ampliar el marco de validez visto recién a la definición general de naturaleza.

II.2 Un modelo de contexto para el Apoyo Científico y Técnico al accionar regulatorio

La visión de la naturaleza compatible con la gestión regulatoria del riesgo, es la de una naturaleza que es parcialmente tolerante a las acciones que implica la actividad humana. Vale decir que deben establecerse los límites de aceptabilidad de cada práctica.

Uno de los aspectos que afecta la evaluación de las consecuencias de cualquier actividad es la incertidumbre en el conocimiento. Una definición simple de la incertidumbre es: grado de desconocimiento acerca de si una situación pasada, presente o futura puede ser considerada verdadera o falsa. La necesidad de esta definición será evidente en lo que sigue, dado que la incertidumbre existe cuando no hay estadística para avalar la probabilidad de ocurrencia de un hecho.

En relación con la presentación de Adams [1] ya vista, considerando ahora que aplica a la naturaleza, la Figura 2 indica cual es el concepto de límite en una práctica, entendido como aquel que la hace aceptable en términos de los perjuicios a la naturaleza. Como puede inferirse de esta figura, si se mantienen las perturbaciones en la zona de respuesta normal (es decir la comprendida entre los picos y marcada en la derecha por la línea vertical de puntos y rayas), será posible mantener acotadas en un contexto de normalidad las consecuencias de la actividad. Superado el límite, la respuesta es anormal. La banda de variación del valor esperado como consecuencia es la dispersión en la valoración de la misma y está determinada por el nivel del conocimiento y el que de él tienen los expertos del grupo regulador. Este grupo tratará que las perturbaciones sean tales que la bola no



pase por encima de la cresta. En la determinación del valor esperado de la consecuencia de una práctica y en la del ancho de la banda de dispersión está implícito un principio particular de precaución o, en la nomenclatura de [7], un enfoque precautorio. El límite de la práctica es el indicado con la línea a rayas y tiene en cuenta la exactitud de las predicciones de los modelos o de la interpolación del conocimiento experimental. Habitualmente incluye un factor de seguridad. Debe notarse que la banda de dispersión no excluye la aparición de un resultado que exceda dicha banda, al menos con bajísima probabilidad⁸. Esta aparición de valores fuera de la banda de dispersión está asociada a la incertidumbre. Razonablemente, la banda de incertidumbre incluye la de la dispersión. Las decisiones regulatorias se toman utilizando enfoques razonablemente conservativos, siendo el grado de conservatismo proporcional a las incertezas de los parámetros considerados y a la magnitud de las consecuencias posibles. Típicamente, cuando se trata de efectos en los humanos y la información estadística está basada en experimentos con modelos animales, el factor que se aplica es del orden de 1/100, producto de un factor 1/10 para considerar la incertidumbre asociada a la diferencia entre un modelo animal válido y el hombre y otro factor 1/10 para considerar la incertidumbre asociada a las variaciones esperadas dentro de la población animal estudiada. Sin embargo, los factores aplicados suelen ser aun menores.

En el ámbito de la ARN, las tareas de Investigación y Desarrollo (I+D) ya sea en su realización o promoción, están asociadas a la determinación, conocimiento y evaluación de los escenarios de exposición a las RI, a los efectos de éstas, a la relación entre los costos y los beneficios de las prácticas, a la optimización de las prácticas desde el punto de vista de las dosis y riesgos en el público y los trabajadores y a la especificación de los límites de dosis en el público y los trabajadores que son consecuencia de las prácticas. En los aspectos biológicos (los naturales para la PR), la I+D en una entidad reguladora debería estar asociada esencialmente con la caracterización y cuantificación de las dosis recibidas por una persona, a través de indicadores biológicos y también en el tratamiento de las sobre-exposiciones.

Nótese que en lo anterior se considera natural la realización de tareas de I+D en el ámbito regulatorio. Sin embargo, la conciencia de

⁸ En opinión del autor, la única instalación industrial con riesgo real nulo de accidente es la que no se construye. Adicionalmente, el impacto (del tipo que sea) nulo de una instalación construida (cualesquiera esta sea) no existe. Nótese que no existe una definición de impacto ambiental de validez "universal".

esta necesidad suele ser todavía motivo de discusión, aun cuando la tendencia internacional actual es la de la aceptación. En efecto, en un marco de pertinencia, dichas tareas permiten tener en cuenta las necesidades de PR en el futuro cercano (en particular debido a la aparición continua de nuevas tecnologías) y establecer pautas a reflejar en la normativa. Al mismo tiempo, permite incrementar el conocimiento y así mejorar la comprensión de los procesos físicos sobre los que se centrará la regulación.

Sin las tareas de I+D no es posible cumplir con los tres principios básicos de la Protección Radiológica: a) justificación (de las prácticas en el sentido de que generen más beneficios que daños), b) optimización de la protección (en el sentido de mantener lo más bajo que sea razonablemente posible el número de personas y las dosis que éstas reciben teniendo en cuenta aspectos económicos y sociales) y c) la aplicación de límites de las dosis (generadas en las exposiciones planificadas, con excepción de los tratamientos médicos), siempre en relación con la RI de origen nuclear. Estos principios fueron consolidados en 1977, en la Publicación 27 de la International Commission on Radiological Protection (ICRP) [9]. Como puede notarse, los dos primeros están relacionados con las fuentes y el tercero se refiere a los individuos particulares. Debe tenerse en cuenta otra vez que, en lo que hace a los efectos estocásticos, la PR está basada, en una hipótesis lineal de probabilidad de daño vs. dosis. Es decir que solamente la probabilidad de un daño debido a las RI es nula para dosis nula. De aquí la importancia de los tres principios mencionados.

II.3 El ejercicio de la precaución en el accionar regulatorio, límites y principios

II.3.1 El Principio de Precaución

Como fuera visto en la Figura 1, una de las acepciones míticas de la NF es la inestabilidad incondicional a las perturbaciones. Como no es posible introducir perturbaciones manteniendo estable su respuesta, es natural que la regulación del riesgo en ese caso se encare a partir de la aplicación a ultranza del denominado Principio de Precaución, que se introduce en lo que sigue.

En su enunciación formal [10, 11], el principio de precaución establece que “Cuando una actividad implica una amenaza de daño al ambiente o a la salud humana, se deben tomar medidas precautorias aun si alguna relación de causa y efecto no está totalmente es-

tablecida científicamente”⁹. La Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo [10] estableció una versión¹⁰ que indicaba que “cuando hay amenazas de daños serios o irreversibles, la falta parcial o total de certeza científica no debe ser usada como una razón para posponer medidas efectivas de costo-beneficio para prevenir la degradación ambiental”.

En otros foros, también interesados en el ejercicio de la precaución (e.g. el foro de Wingspread [11])¹¹ no hacen demasiadas consideraciones sobre los costos y beneficios y mencionan principalmente que no debe dejarse el peso de la prueba en aquellos que serán eventualmente perjudicados por una práctica. Las acciones a tomar deberían incluir el no accionar. La aplicación fundamentalista del Principio de Precaución podría llevar a la parálisis social y, para actividades

⁹ Textual: “When human activities may lead to morally unacceptable harm that is scientifically plausible but uncertain, actions shall be taken to avoid or diminish that harm. Morally unacceptable harm refers to harm to humans or the environment that is

- Threatening to human life or health, or
- Serious and effectively irreversible, or
- Inequitable to present or future generations, or
- Imposed without adequate consideration of the human rights of those affected.

The judgment of plausibility should be grounded in scientific analysis. Analysis should be ongoing so that chosen actions are subject to review. Uncertainty may apply to, but need not be limited to, causality or the bounds of the possible harm. Actions are interventions that are undertaken before harm occurs that seek to avoid or diminish the harm. Actions should be chosen that are proportional to the seriousness of the potential harm, with consideration of their positive and negative consequences, and with an assessment of the moral implications of both action and inaction. The choice of action should be the result of a participatory process”. [11]

¹⁰ Textual: As per Principle 15 of the 1992 Rio Declaration on Environment and Development, the precautionary principle says that, “Where there are threats of serious or irreversible damage, lack of full scientific certainty shall not be used as a reason for postponing cost-effective measures to prevent environmental degradation”.

¹¹ Textual: “... While we realize that human activities may involve hazards, people must proceed more carefully than has been the case in recent history. Corporations, government entities, organizations, communities, scientists and other individuals must adopt a precautionary approach to all human endeavors.

Therefore it is necessary to implement the Precautionary Principle: Where an activity raises threats of harm to the environment or human health, precautionary measures should be taken even if some cause and effect relationships are not fully established scientifically. In this context the proponent of an activity, rather than the public bears the burden of proof. The process of applying the Precautionary Principle must be open, informed and democratic, and must include potentially affected parties. It must also involve an examination of the full range of alternatives, including no action”.

como la nuclear, son invocadas típicamente por las organizaciones no gubernamentales antinucleares. Nótese, con todo, que la definición internacional implica la evaluación del riesgo-beneficio y, entonces, la posibilidad de poder optar políticamente sobre bases técnicamente fundadas. En particular en [8], se discute y se aclara *que cosa no es* el Principio de Precaución (en particular no postula el riesgo nulo para decidir) y como, en las traducciones de la declaración original de Río de Janeiro, se usa “**approach**” en inglés y “**principio**” en castellano. En [8] se indica que un “**approach**” o “**enfoque**” como lo denominaremos en lo que sigue, es la aplicación práctica de lo establecido por un principio, que sienta la base filosófica del accionar en lo referido a la precaución. Si bien no es legalmente vinculante, la diferencia es sustantiva para este Autor, al menos en la percepción. En efecto, parece menos grave errar en una aplicación o interpretación de un principio que violarlo, a pesar de la relación causal (el errar en la aplicación implica la violación). En este caso, lo que se juzga para esta valoración es la intención.

II.3.2 Enfoque Precautorio

En [7], se establece una diferenciación clara entre la **aplicación del Principio de Precaución** y el **Enfoque Precautorio**¹², siendo este último el considerado adecuado para el accionar regulatorio.

El “Enfoque Precautorio” es una denominación científica utilizada para describir el proceso cauteloso que utilizan los científicos cuando convierten datos experimentales en asesoramientos sobre límites de exposición, ya sean para el público u ocupacional, a cualquier agente tóxico. Contrariamente, el Principio de Precaución es un principio político, utilizado para tomar decisiones políticas.

Paralelamente [12], para la búsqueda del incremento del conocimiento para fundamentar el accionar regulatorio, la Gerencia Apoyo Científico Técnico (GACT) de la ARN estableció dos principios, parte de un conjunto de Principios Éticos, como siguen:

Principio de Visión de la Naturaleza

En la GACT se acepta que la naturaleza, como receptor final y natural de las consecuencias de toda la actividad humana, es tolerante a perturbaciones dentro de límites. Todo el personal, con precaución y en lo que es pertinente, se esfuerza cada día en no comprometer, mas allá de lo que conoce como límites aceptables

¹² Se recuerda que es usado como forma castellana de “*Precautionary Approach*”.

y compatibles con el beneficio social global, el detrimento de la naturaleza.

Principio Particular de Precaución

En la GACT se acepta que la determinación y recomendación de los límites que hacen aceptable la actividad nuclear para las personas y el medio ambiente, es decir para la naturaleza, se rige por la precaución, incluyendo los factores económicos y sociales.

Como puede observarse, el enfoque precautorio de [7] y los dos principios mencionados son consistentes conceptualmente. También, el “***Principio Particular de Precaución***” visto recién es absolutamente coherente con lo indicado como Enfoque Precautorio y lo ilustrado en la Figura [2]

II.3.3 Principio Precautorio y Enfoque Precautorio

El Principio de Precaución es un principio político, utilizado para tomar decisiones políticas. Contrariamente, en opinión del autor, la posición regulatoria debería estar siempre asociada al Enfoque Precautorio. Es posible aplicar el Principio de Precaución (i.e. generar una decisión política que afecte la regulación) en un ámbito distinto al de una entidad regulatoria (el Congreso y el Poder Ejecutivo, en suma parte del gobierno pues el Poder Judicial tampoco debería aplicar el Principio de Precaución, aun cuando aplica con frecuencia medidas cautelares) pero siempre luego del análisis de los hechos a partir del análisis de riesgos y beneficios. Esta es una posición filosófica coherente con la esencia del Enfoque Precautorio.

Idealmente, el accionar regulatorio no incluye situaciones de fuerte presión mediática, pública o judicial. Fuera de esta situación ideal, se entraría en el dominio del accionar regulatorio condicionado por la percepción que las personas o el sistema tienen de la actividad. El cambio de actitud de un ente regulador en medio de una crisis genera aun más desconfianza en el estamento político y en el público con una percepción negativa y por ello el Enfoque Precautorio debería ser mantenido a ultranza.

Cuando desde el ente regulador se actúa sin establecer claramente un Enfoque Precautorio, pueden producirse desacuerdos conceptuales entre el regulador y los regulados y prima en éstos la sensación de arbitrariedad en el accionar del ente regulador. La suma de los dos efectos: el posible incremento de la desconfianza del público y la sensación de arbitrariedad en el accionar regulatorio de parte de los regulados, es de claro impacto negativo en la actividad. El empleo del

Enfoque Precautorio hace a la coherencia del accionar regulatorio pero, ciertamente, es una condición necesaria pero no suficiente a los fines de la percepción del riesgo y la credibilidad que puede tener una sociedad o el regulado sobre su organismo de control. Es evidente que al Principio de Precaución lo invocan los afectados por el riesgo y que pueden legislar sobre su base sus representantes políticos, mientras que el Enfoque Precautorio es invocado por el regulador con relación al que es afectado por el riesgo. Ello implica una diferencia no trivial, ya que está de por medio la credibilidad de la institución reguladora, medida por la confianza y afectada por la percepción que el público tiene de los perjuicios. Nótese, de todos modos, que la institución reguladora es impuesta al público por sus representantes y que éstos le otorgan por ley sus incumbencias.

Es oportuno, entonces, decir ahora que uno de los objetivos de la Autoridad Regulatoria Nuclear, a través de la Comunicación Institucional, es fortalecer la confianza del público en su organismo regulador, como actor primario en la aplicación del Enfoque Precautorio que permite establecer y aplicar los límites que aseguran la PR de las personas y del medio ambiente, i.e. la de la naturaleza. También es oportuno aclarar que un aspecto a considerar en el posicionamiento del regulador frente a la sociedad es la motivación asociada a su tarea y su actitud frente a las consecuencias de su desempeño. La realidad es que lo único positivo de la tarea del regulador es la promoción de la seguridad y su aseguramiento a través de la aplicación de la normativa. La percepción que el público tiene de ella no debería ser un condicionante si se actúa en forma fundada en el conocimiento y sin presiones políticas. El grado de éxito de su tarea de promoción de la seguridad se mide por la ausencia de hechos negativos en la actividad (accidentes radiológicos o nucleares o consecuencias radiológicas de la actividad). Es difícil medir y valorar la ausencia de hechos (lo positivo es la ausencia de hechos negativos). En efecto, es difícil valorar positivamente que durante un periodo no haya sucedido un accidente con consecuencias importantes para la salud de las personas o el medio ambiente. La ausencia de accidentes puede deberse a causas fortuitas o simplemente a que el efecto desencadenante tiene muy baja probabilidad de ocurrencia. En ambos casos, no es posible vincular dicha ausencia directamente al accionar regulatorio y no debería esperarse que el público establezca *per se* dicha asociación. Por otra parte, debe notarse que el accionar regulatorio se torna positivo (en términos de producir hechos visibles por el público) cuando se trabaja en la mitigación de las consecuencias de un hecho

negativo (accidentes radiológicos o nucleares o consecuencias radiológicas de la actividad).

II.4 Una definición posible de un regulador nuclear

Podemos proponer, a partir de lo discutido hasta ahora, que:

“El regulador nuclear es un individuo jerarquista, que entiende que la naturaleza es tolerante dentro de límites, por lo que le preocupan las personas y el medio ambiente y por eso, en lo radiológico y nuclear, trabaja en su protección sobre la base de la regulación y utilizando un enfoque precautorio”.

Esta definición permite establecer en términos explícitos la posición del regulador frente a la sociedad.

II.5 La cuestión ética en la regulación de las RI

Varias veces hemos ya comentado que un aspecto central en la PR lo constituye la consideración de los aspectos éticos en lo referido a los efectos de las RI en la naturaleza. Seguramente debido al estigma del comienzo de la liberación incontrolada¹³ de la energía nuclear a través de la fisión (eufemismo por “bomba nuclear”) y a partir de ello la percepción (en particular la negativa) asociada a las RI, la cuestión ética ha sido y continúa siendo un aspecto central en lo relacionado con ellas. Por ello es necesario cerrar este apartado con algunas consideraciones sobre la ética en el empleo de las RI. Solamente haremos algunas consideraciones de precedencia con relación a la NF y a la NH y una enunciación de los enfoques posibles. El análisis detallado de esta cuestión será motivo de un trabajo futuro.

Consideremos como ejemplo (por supuesto no es el primero históricamente) la presentación de Giovanni Silini en su conferencia Sievert de 1992 [14], en la que responde a una pregunta que se formula a sí mismo: “¿El sistema actual de la PR está basado sobre bases éticas válidas?”. A esta pregunta contesta que: “Creo que la respuesta debería ser ‘SÍ’, porque las proposiciones éticas en las que está basado son buenas, las metodologías para desarrollar un conjunto de recomendaciones a partir de los principios básicos son moralmente aceptables y, el sistema se presenta como razonablemente coherente,

¹³ De paso, es interesante notar que la energía nuclear a partir de la fisión fue realizada en forma controlada con anterioridad a su uso militar

flexible y lo bastante exigente para mantener los riesgos bajos pero no-cero, lo que sería un objetivo imposible de cumplir en tanto y en cuanto haya beneficios a ganar a partir del uso de las RI”.

La ICRP [13] también ha discutido los aspectos éticos de la PR en el contexto de exposiciones prolongadas a las RI, tales como las que surgen de la contaminación del suelo luego de un accidente nuclear y que han dado origen a problemas sociales y, como consecuencia, a discusiones sobre los principios éticos en los que debería basarse la PR. Aun cuando la ICRP no ha referenciado ninguna doctrina filosófica específica en la formulación de sus recomendaciones, los principios en los cuales está basada la PR son un ejemplo de dos principios éticos comúnmente aceptados. Por una parte el sistema requiere que se asegure la PR de individuos identificados; por ejemplo se requiere que los efectos determinísticos sobre los individuos sean prevenidos y que los efectos estocásticos estén restringidos. Esta posición puede ser vinculada directamente con una ética deontológica. Por otra parte, el sistema requiere que los principios guía de la PR deberían ser tales que permitan obtener un beneficio positivo para la salud de un número lo más grande posible de los miembros de la sociedad bajo las condiciones económicas y sociales prevalecientes para la exposición considerada. Por ejemplo, se requiere que las dosis sean mantenidas tan bajas como sean razonablemente alcanzables, teniendo en cuenta factores económicos y sociales. Esta posición puede ser vinculada directamente con una ética utilitaria. La consideración de ambos tipos de ética es vista por la ICRP como crítica para la aceptación social de la PR en situaciones de exposición prolongada.

Para analizar cual es la forma ética en la que se enmarca la PR, es conveniente tener en cuenta el análisis de Grenstad y Per Selle [4]. Los datos de la citada referencia fueron tomados a partir de una encuesta realizada en 1995, sobre doce organizaciones ambientalistas en Noruega, de las cuales se eligieron al azar casi 3.700 miembros. Para el análisis, cuando tiene en cuenta la correspondencia de las visiones míticas de la NF y NH, establece un conjunto de precedencias que, adaptadas a una forma gráfica, son las que se indican en la Figura 3.

Las conclusiones del análisis permitieron a Grenstad y Per Selle [4] concluir que las formas gráficas de la Figura [1] son aceptadas y entendidas. Sin embargo la asociación entre NF y NH es la de NF tolerante entre límites y NH igualitarista (se considera esta coincidencia como aparentemente irracional). Los resultados muestran fallar, contrariamente a lo sostenido por los teóricos culturalistas, en

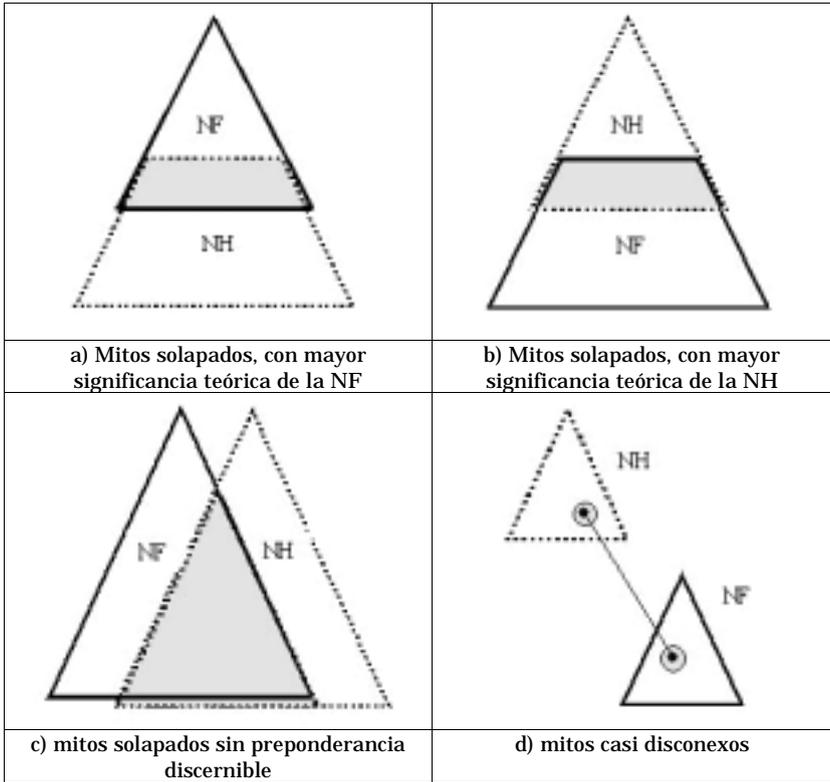


Figura 3. La consistencia de las visiones míticas [4]

verificar que hay patrones de consistencia entre los mitos de la NF y la NH. En [4] el énfasis está puesto en el análisis de esa consistencia y concluyen que considerar los mitos por separado lógicamente no sería una opción válida en el contexto de [5]. También consideran (recordar que la referencia [4] es de 2000) que el incremento de la conciencia ambientalista llevaría a una conexión cada vez mas importante entre NF y NH. Sin embargo, en una población con fuertes convicciones democráticas, el resultado de la encuesta aparece como razonable.

Sin embargo, en este trabajo se propone que el grado de solapamiento que impone considerar la protección de la naturaleza (la PR es un caso particular de la protección) puede considerarse como el ilustrado en la Figura 4, es decir que no hay diferencias entre dichas visiones míticas porque hay una sola naturaleza, que es considera-

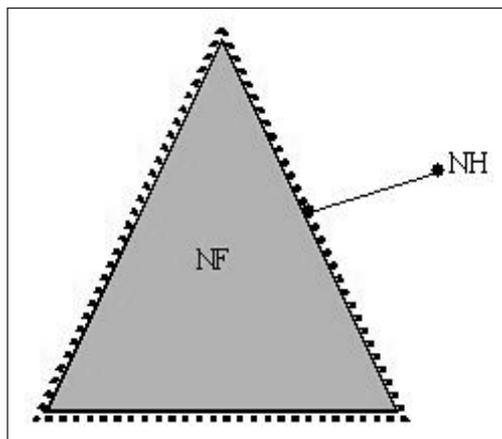


Figura 4. NH y NF unificadas en “Naturaleza”

da tolerante entre límites¹⁴. Esto es coherente con lo sostenido desde hace mucho tiempo por el ICRP, en el sentido de que una adecuada protección de la NH asegura lo mismo para la NF.

Es posible, entonces, decir que los conceptos disociados de ética deontológica para la PR del hombre, seguida de una consideración utilitarista para la optimización de la misma no son necesarios. Así, realmente, la aceptación de la PR enmarcada en la ética de la virtud adoptada como partida (i.e. la imposición de buen vivir en todo orden) impone la adecuada protección de la naturaleza como postulado. Es interesante tener en cuenta [15] para una discusión detallada de una “ética ambientalista”.

En suma, puede decirse que las personas, adoptando la ética de la virtud, lo que asegura su buen vivir, aseguran la adecuada PR para ellos mismos y la NF, es decir la adecuada PR de la naturaleza.

Sin embargo, actualmente y en términos internacionales, se tiende a evaluar por separado las consecuencias de las RI para la NH y la NF. Hay también otra objeción al razonamiento propuesto, derivada de la diversidad de la concepción filosófica entre etnias: ¿existe una ética universal? Se tiende, erróneamente a criterio de este Autor, a una universalización de los criterios de la PR (denominada generalmente ‘armonización’). No es demasiado creíble que etnias

¹⁴ Con todo, nuestra posición antropocéntrica nos llevaría a considerar a la NH como algo más general o abarcador que la naturaleza de la que somos parte.

con creencias dispares de trascendencia de las personas, puedan aceptar criterios 'universales'. La ampliación de estos conceptos queda para un futuro trabajo.

III. CONCLUSIONES

En los párrafos anteriores se han discutido aspectos relacionados con el marco conceptual de la regulación de las radiaciones ionizantes de origen nuclear.

En particular:

- Se ha introducido una visión unificada de la persona y el medio ambiente al efecto de considerar la Protección Radiológica y se ha delineado una fundamentación para la aceptación de una ética para la misma.
- El sistema regulatorio radiológico y nuclear es un conjunto de prescripciones o reglas, basado en un enfoque precautorio que asegura para la naturaleza (i.e. para las personas y el medio ambiente) una protección adecuada ante los efectos nocivos de las RI.
- El regulador nuclear es una persona comprometida socialmente, empeñado en la protección de la naturaleza de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes de origen nuclear.
- La posición ética del regulador nuclear es independiente de cualquier consideración no técnica que lo separe de dicho empeño.
- El regulador nuclear es, además, técnicamente racionalista y desarrolla las tareas de I+D pertinentes que permiten acrecentar el conocimiento que da sustento a la tarea regulatoria. Esta última implica el otorgamiento de las licencias de construcción y operación de las instalaciones que generan RI, de las licencias del personal que las opera, inspeccionar el cumplimiento de la normativa, regular el transporte de material radiactivo, realizar tareas de inspección en el área de la seguridad radiológica, nuclear, seguridad física, salvaguardias y no-prolifерación para el uso pacífico de la energía nuclear y la participación activa en foros internacionales, siempre en lo referido a las RI de origen nuclear.
- Si el organismo regulador es coherente con su esencia, no aplica el Principio de Precaución.

- Un organismo regulador éticamente comprometido con la PR de la naturaleza y el beneficio global de la sociedad, aplica un Enfoque Precautorio en su accionar.
- Si se acepta la consideración de la PR de la NF separadamente, no debería dejarse de lado que la protección adecuada de las personas (trabajadores y público) asegura la correcta PR de la NF.

Como conclusión de cierre, en opinión del Autor, la regulación de las RI de origen nuclear tiene una base racional, fundada científicamente y el apartamiento del camino de la razón (que implica también el no considerar un Enfoque Precautorio) está fuera de consideración en el marco regulatorio. Un desvío de un organismo regulador de la anterior aseveración solo genera daño a la actividad y desazón en los regulados.

La regulación sobre la base de la razón ha sido la tradición de la Protección Radiológica en la Argentina, a la cual la ARN adhiere y da soporte. La ARN ha tenido la fortuna de ser internacionalmente señera en el establecimiento de criterios de PR a través de sus especialistas, notablemente el Dr. Dan J. Beninson hasta su muerte en 2003 y, en el presente, el Ing. Abel J. González, junto a un grupo de especialistas que participan activamente en las instituciones internacionales. Mantener esa tradición transfiriendo el conocimiento a sus miembros más jóvenes, es una tarea no trivial y es parte de la responsabilidad de todos los especialistas de la ARN.

RECONOCIMIENTO

El autor agradece a los Dres. Francisco Spano y Roberto Mercauder y a los Ings. Alfredo L. Biaggio y Abel J. González sus útiles comentarios. Las discusiones con AJG han sido particularmente inspiradoras y han guiado al Autor en la consolidación de algunos conceptos.

Referencias

1. Adams, J., *Risk*, UCL Press, 1995.
2. Holling, C. S., "Myths of Ecological Stability: Resilience and the Problem of Failure", en *Studies of Crisis Management*, G. Smart y W. Stenbury (Eds.), Montreal, Butterworth, Cap. 4, pp. 97-107, 1979.

3. Schwarz, M. y Thompson, M., *Divided we stand* (Redefining Politics, Technology and Social Choice), Harvester Wheatsheaf, UK, Cap. 1, pp. 1-13, 1990.
4. Grendstad, G. y Per Selle, "Cultural Myths of Human and Physical Nature: Integrated or Separated?", *Risk Analysis*, 20, N° 1, pp. 27-39, 2000.
5. Thompson, M., Ellis, R. y Wildavsky, A., *Cultural Theory*, Westview Press, USA, 1990.
6. Gambetta, D., "Can We Trust Trust?", in Gambetta, Diego (Ed.), *Trust: Making and Breaking Cooperative Relations*, electronic edition, Department of Sociology, University of Oxford, chapter 13, pp. 213-237, 2000.
7. Radiation, Risk and Society Advisory Group, *In Terms of Risk*, Documents of the NRPB, Vol. 15, No. 4, 2004.
8. World Commission on the Ethics of Scientific Knowledge and Technology (COMEST), *The Precautionary Principle*, UNESCO, 7 Place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France, 2005
9. ICRP, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 27, 1977.
10. *Rio Declaration on Environment and Development*, June 14, 1992, U.N. Doc., A/CONF. 151/5/Rev.1, 1992.
11. *Wingspread Statement: Common sense way to protect*. Wingspread Conference Center, Racine, Wisconsin, January 23–25, 1998; ver: <http://www.gdrc.org/u-gov/precaution-3.html> ; accedido el 8 de enero de 2008.
12. *Manual de la Calidad*, Gerencia de Apoyo Científico Técnico, Autoridad Regulatoria Nuclear, 2004.
13. ICRP, *Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure*, J. Valentin (Ed.), ICRP Publication 82, 2000.
14. Silini, G., "Ethical Issues in Radiation Protection – The 1992 Sievert Lecture", *Health Physics*, 63, N° 2, pp. 139-148, 1992.
15. Brennan, A. y Yeuk-Sze Lo, "Environmental Ethics", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2008 Edition), E. N. Zalta (Ed.), ver <http://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/ethics-environmental/> accedido el 20 de octubre de 2008.

Autoridad Regulatoria Nuclear
Av. del Libertador 8250
(1429) Buenos Aires

HISTORIA DE LAS APLICACIONES BIOMÉDICAS DE LAS RADIACIONES Y LOS RADIOISÓTOPOS

Prof. Dr. MARIO A. PISAREV

Si bien se conocía la existencia de los radioisótopos desde hacía ya varias décadas, fue recién alrededor de los años posteriores a la Segunda Guerra Mundial que se planteó la posibilidad de su aplicación en Medicina. Los primeros ensayos se realizaron en Boston (USA) utilizando ^{131}I para evaluar el funcionamiento de la tiroides. Posteriormente se ampliaron los estudios al uso de ^{32}P como indicadores en hematología. Dados los resultados satisfactorios obtenidos se comenzó a difundir su uso en diferentes centros asistenciales de ese país y de otros en el hemisferio norte. Un poco más tarde se pasó a utilizar el ^{131}I para el tratamiento del hipertiroidismo y del cáncer diferenciado de tiroides. Los avances fueron continuos a partir de los éxitos logrados. Se comenzaron a desarrollar nuevos compuestos radiactivos (llamados en la jerga técnica compuestos “marcados”) que ampliaron las aplicaciones a otras patologías, como las de riñón, cerebro, sistema cardiovascular, hígado, etc. En años más recientes se agregaron los isótopos de vida media corta, disminuyendo la radiación a recibir por el paciente, especialmente niños. También fue mejorando la calidad de los equipos utilizados en Medicina Nuclear, lo que permitió optimizar la calidad de las imágenes obtenidas. Finalmente se desarrollaron los equipos de tomografía por emisión de positrones (PET) que han significado un enorme avance en los métodos diagnósticos, especialmente en la detección temprana de tumores y/o de sus recidivas.

Los usos de las radiaciones, en forma de radiografías, comenzó más tempranamente y pronto se amplió a la radioterapia para el tratamiento de diferentes patologías, especialmente tumores. Cabe señalar que los avances en las aplicaciones de las radiaciones y de los radioisótopos fueron desarrollándose en función de los logros en física nuclear y en química.

A fines de los años 20 el prestigioso físico Lawrence propuso la aplicación del análisis por activación al tratamiento del cáncer. La idea era que si se lograba que un tumor concentrara selectivamente boro no radiactivo (^{10}B), la irradiación del área tumoral con un haz apropiado de neutrones activará al boro, convirtiéndolo en radiactivo (^{11}B) que decae liberando partículas alfa y ^7Li , que tienen gran poder de ionización, destruyendo así el tumor. En los años 50 el Dr. Swift de la Universidad de Harvard, comenzó a realizar ensayos clínicos utilizando sales de boro, pero los resultados no fueron satisfactorios. Uno de sus discípulos, el Dr. Hatanaka, continuó los estudios a su regreso a Japón. Las aplicaciones de la terapia por captura neutrónica en boro (BNCT) fueron alentadoras y a partir de entonces se está ensayando esta modalidad en diferentes países del mundo (USA, Europa, Japón, Argentina). Los compuestos utilizados en la actualidad son el boracaptato (BSH) y la borofenilalanina (BPA).

Por otra parte las aplicaciones de las radiaciones se han extendido hacia otras áreas. Las investigaciones en biología, bioquímica, biología molecular, veterinaria y medicina se han visto favorecidas por la utilización de moléculas marcadas que permitieron los estudios tanto "in vivo" como "in vitro" del metabolismo, su regulación y sus alteraciones. Yalow y Berson (USA) desarrollaron el radioinmunoanálisis que permitió la determinación de muy pequeñas concentraciones de una molécula en muestras biológicas y humanas. Este avance fue de singular importancia para el diagnóstico de numerosas enfermedades. Además se aplican las radiaciones para la esterilización de material quirúrgico y de uso corriente, el control de plagas (método del macho estéril), la conservación de alimentos, entre otros. También se utiliza la gammagrafía en la industria para el control de calidad de materiales.

La utilización de métodos que incluyen radiaciones y/o radioisótopos requiere de normas de seguridad que controlen y prevengan efectos no deseables. En este sentido se han establecido las mismas a través de diferentes organizaciones, como la Agencia Internacional de Energía Atómica y otras locales o regionales.

Desarrollos en nuestro país

Desde el descubrimiento de los rayos X y posteriormente de los isótopos radiactivos, se comenzaron las investigaciones y aplicaciones de los mismos en diagnóstico y tratamiento en Medicina. Los

primeros estudios radiobiológicos realizados en nuestro país tuvieron lugar en el Instituto de Medicina Experimental (actual Instituto A. H. Roffo, dependiente de la Universidad de Buenos Aires) en 1926. Por otra parte, los primeros estudios de epidemiología médica con radioisótopos se realizaron con ^{131}I para determinar las causas del bocio endémico en Mendoza. El equipo de trabajo estuvo constituido por el grupo de Harvard-MIT (USA), liderado por el Dr. John B. Stanbury, junto con el Dr. Hector Perinetti y sus colaboradores, del Hospital Central (1949-50). Este estudio fue el primero en el mundo en que se utilizó un radioisótopo en estudios de epidemiología y abrieron una nueva perspectiva en las aplicaciones para el estudio de problemas sanitarios.

En CNEA

Desde sus inicios la CNEA mostró especial atención a las investigaciones y aplicaciones de los radioisótopos y las radiaciones en Medicina. En 1952 se crea el Departamento de Biología y Medicina, y en 1957 la División de Investigaciones Radiobiológicas. Se construye el bioterio y los laboratorios de genética y de rayos X. En 1962 el Departamento de Medicina y Biología se convierte en Departamento de Radiobiología. En 1958 se crea el Laboratorio de Medicina Nuclear en el Hospital de Clínicas (UBA), que en 1962 se transforma en el Centro de Medicina Nuclear. En 1966 se firma el primer Convenio entre la Universidad de Buenos Aires y la CNEA para el funcionamiento del CMN del Hospital de Clínicas. Un año más tarde, mediante un préstamo del BID, se equipa totalmente el CMN con los instrumentos de última generación. A partir de esa fecha el CMN se convierte en un referente local e internacional de excelencia para la formación de recursos humanos en el tema, especialmente en el ámbito latinoamericano.

Continuando con los esfuerzos para el desarrollo de la Medicina Nuclear, en 1969 se crea el Centro Oncológico de Medicina Nuclear en el Instituto A. H. Roffo en el marco del mismo Convenio entre la Universidad de Buenos Aires y la CNEA. Finalmente en 1991, por acuerdo entre la CNEA, la Universidad de Cuyo y el Gobierno de la Provincia de Mendoza, se crea la Fundación Escuela de Medicina Nuclear de Mendoza (FUESMEN), centro de alta complejidad.

Cabe destacar que la CNEA ha cumplido un importante papel en la formación de recursos humanos. Se han dictado numerosos

cursos de radioisótopos para médicos, técnicos, biólogos y bioquímicos. Los alumnos así formados no sólo cubren amplias áreas de nuestro país sino también de otros países de Latinoamérica. Actualmente la Medicina Nuclear ha pasado a ser una herramienta de diagnóstico y tratamiento eficaz en casi todos los centros asistenciales del país.

También desde épocas tempranas la CNEA desarrolló tareas de investigación y de aplicaciones del uso de las radiaciones y de los radioisótopos. En 1966 se crea la División Bioquímica Nuclear, que junto con las Divisiones de Radiomicrobiología, de Patología de la Radiación y Aplicaciones Agropecuarias han contribuido al avance del conocimiento y al desarrollo de aplicaciones en diferentes áreas, así como a la formación de recursos humanos.

La producción de radioisótopos y de moléculas marcadas ha sido otra de las funciones de la CNEA, de forma de asegurar el normal funcionamiento de los centros asistenciales y de investigación que los utilizan.

Actualmente el Departamento de Radiobiología comprende tanto a los Centros de Medicina Nuclear del Hospital de Clínicas y del Instituto Roffo, ambos por convenios con la Universidad de Buenos Aires, así como a las Divisiones de I y D, localizadas en el Centro Atómico Constituyentes, Bioquímica Nuclear, Patología de la Radiación y Radiomicrobiología. En las mismas se llevan a cabo investigaciones acerca de las alteraciones producidas por radiaciones, contaminantes y carcinógenos en sistemas biológicos, empleando modelos experimentales de distinto grado de complejidad. Asimismo se estudian los efectos terapéuticos de las radiaciones.

Las modificaciones producidas a nivel molecular, así como su reparación y la regulación de los mecanismos involucrados, se estudian en microorganismos de características genéticas determinadas, los efectos sobre células y tejidos se investigan en lesiones de piel y mucosa bucal y en las alteraciones producidas en la remodelación ósea, los efectos sobre la regulación de órganos se estudian en tiroides en condiciones normales y patológicas. El daño hereditario se estudia en *Drosophila*. Se investiga además la distribución de daño por iones pesados en materiales orgánicos e inorgánicos. Entre los proyectos aplicados pueden mencionarse los relacionados con la modulación (radioprotección y radiosensibilización) de la respuesta a las radiaciones de diferentes órganos y tejidos. De especial interés son los estudios acerca de los efectos sobre tumores y sus aplicaciones (terapia por captura neutrónica en boro, BNCT, y pro-

tonterapia), así como sobre aspectos bioquímicos y moleculares relacionados con el cáncer.

Jefe, Depto. de Radiobiología, CNEA y Director del Departamento de Bioquímica Humana, Facultad de Medicina, Universidad de Buenos Aires. Co-director Maestría en Bioquímica, Fisiopatología y Clínica Endocrinológica, Facultad de Ciencias Biomédicas, Universidad Austral.

Miembro de la Academia de Medicina de Francia.

MESA DIRECTIVA

- 2009-2011 -

Presidente

Dr. HUGO FRANCISCO BAUZÁ

Vicepresidente 1º

Dr. MARCELO A. DANKER

Vicepresidente 2º

Dr. FAUSTO T. L. GRATTON

Secretario

Dr. MARCELO U. SALERNO

Prosecretario

Ing. ANTONIO A. QUIJANO

Tesorero

Ing. LUIS ALBERTO DE VEDIA

Protesorera

Dra. ANA MARÍA MARTIRENA-MANTEL

Impreso durante el mes de agosto de 2009 en *Ronaldo J. Pellegrini Impresiones*,
Bogotá 3066, Depto. 2, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, República Argentina
correo-e: pellegrinirj@gmail.com