

## MARCOS DA HISTÓRIA DA RADIOATIVIDADE E TENDÊNCIAS ATUAIS

Allan Moreira Xavier, André Gomes de Lima, Camila Rosa Moraes Vigna, Fabíola Manhas Verbi, Gisele Gonçalves Bortoleto, Karen Goraieb, Carol Hollingworth Collins e Maria Izabel Maretti Silveira Bueno\*

Departamento de Química Analítica, Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, CP 6154, 13084-971 Campinas - SP, Brasil

Recebido em 18/5/05; aceito em 14/2/06; publicado na web em 30/8/06

LANDMARKS IN THE HISTORY OF RADIOACTIVITY AND CURRENT TENDENCIES. The first days of radioactivity, the discoveries of X-rays, radioactivity, of  $\alpha$ - and  $\beta$ - particles and  $\gamma$ - radiation, of new radioactive elements, of artificial radioactivity, the neutron and positron and nuclear fission are reviewed as well as several adverse historical marks, such as the Manhattan project and some nuclear and radiological accidents. Nuclear energy generation in Brazil and the world, as an alternative to minimize environmental problems, is discussed, as are the medicinal, industrial and food applications of ionizing radiation. The text leads the reader to reflect on the subject and to consider its various aspects with scientific and technological maturity.

Keywords: the history of radioactivity; nuclear accidents; beneficial uses of radioactivity.

### AS DESCOBERTAS

#### A descoberta dos raios-X

Na noite de 8 de novembro de 1895, o físico alemão Wilhelm C. Röntgen trabalhava em uma sala totalmente escura, utilizando uma válvula com a qual estudava a condutividade dos gases. A certa distância da válvula, havia uma folha de papel tratada com platinocianeto de bário usada como tela. Röntgen viu com espanto a tela brilhar, emitindo luz<sup>1</sup>. Achou que esta luz não poderia ser proveniente da válvula, pois a mesma estava coberta por uma cartolina negra e nada (luz ou raio catódico) poderia ter vindo dela. Surpreso, fez várias investigações. Virou a tela, expondo o lado sem o revestimento de platinocianeto de bário, e esta continuava a brilhar. Colocou diversos objetos entre a válvula e a tela e viu que todos pareciam transparentes, mas não demorou a ter uma surpresa maior, quando sua mão escorregou em frente à válvula e viu seus ossos na tela. Registrou em chapas fotográficas suas observações e só então teve certeza de que estava diante de algo novo. Em 28 de dezembro de 1895, Röntgen entregou à Sociedade Físico-Médica de Wurzburg, Alemanha, um relatório preliminar de sua descoberta, descrevendo as pesquisas que fizera nas sete semanas anteriores: os objetos tornavam-se transparentes diante dos novos raios que, por serem desconhecidos, chamou-os de raios-X<sup>2</sup>. Em 1901, Röntgen foi laureado com o primeiro Prêmio Nobel da Física. Mais recentemente, seu nome foi dado ao novo elemento 111.

#### A descoberta da radioatividade: as partículas $\alpha$ e $\beta$ e os raios $\gamma$

Antoine H. Becquerel, membro de uma família de quatro gerações de físicos de renome, tinha grande interesse pelas áreas de fosforescência e fluorescência moleculares. A descoberta de Röntgen o levou a fazer observações para verificar se substâncias fosforescentes ou fluorescentes emitiam raios-X. Seus primeiros resultados foram negativos<sup>3</sup>. Com experimentos adicionais utilizando urânio, Becquerel chegou à conclusão de que a radiação penetrante era originária do próprio elemento e não tinha relação com o fenômeno da fluorescência<sup>4</sup>. Esta radiação, que inicialmente ficou conhecida como raios de

Becquerel, foi chamada de radioatividade pela polonesa Marie S. Curie, em 1898<sup>5,6</sup>, e logo passou a ser investigada por importantes nomes da época, tais como J. J. Thomson, e também por vários cientistas em começo de carreira.

Dessa forma, em 1900, pouco tempo após as descobertas de Becquerel, o físico neozelandês Ernest Rutherford e o físico francês Pierre Curie identificaram, de forma independente e quase simultaneamente, dois tipos distintos de emissões oriundas dos elementos radioativos. Essas radiações foram denominadas de partículas alfa ( $\alpha$ ) e beta ( $\beta$ ). No mesmo ano, o físico francês Paul U. Villard identificou outra espécie de radiação eletromagnética, que também era emitida por esses elementos, que denominou radiação gama ( $\gamma$ )<sup>6</sup>.

Em 1903, Rutherford propôs a existência do núcleo atômico e verificou-se posteriormente que a radioatividade, com suas emissões  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , era um fenômeno que ocorria com os núcleos instáveis de alguns elementos químicos. Este fenômeno ficou conhecido como decaimento radioativo, onde os átomos do elemento original eram eventualmente transformados em novos elementos<sup>7</sup>. Também foi descoberto que a velocidade do decaimento por unidade de massa é fixa para qualquer radioelemento específico, não dependendo de sua composição química ou de seu estado físico; porém, varia drasticamente de um radioelemento para outro. O decaimento poderia ser expresso em termos de meia-vidas, que é o tempo que leva para a atividade de um radioelemento decair à metade do seu valor original.

Em 1913, os físicos F. Soddy, A. Russell e K. Fajans, em trabalhos independentes, elaboraram uma generalização sobre as emissões  $\alpha$  e  $\beta$ , que ficou conhecida como Lei do Deslocamento: "Quando uma partícula alfa for emitida, o novo átomo será deslocado duas casas à esquerda na Tabela Periódica. E quando for emitida uma partícula beta, o novo átomo estará deslocado uma casa à direita na Tabela Periódica"<sup>7</sup>. Os radioelementos que caíssem na mesma posição da tabela periódica seriam quimicamente idênticos. Soddy propôs, para os elementos deste último caso, o nome de isótopos<sup>1,8</sup>.

#### As descobertas de novos elementos radioativos<sup>6,9</sup>

Em 1895, a polonesa Marya Sklodowska, que já adotara o nome francês Marie, casou-se com Pierre Curie. Aparecia assim, para o mundo científico, o casal Curie, dois dos pesquisadores mais notáveis de todos os tempos. À procura de um tema para sua tese de

\*e-mail: bell@iqm.unicamp.br

doutorado, Marie interessou-se profundamente pelos trabalhos do físico Antoine H. Becquerel. Marie e Pierre Curie começaram então a pesquisar de onde eram provenientes as radiações observadas por Becquerel no minério de urânio. Para isso, instalaram, em um lugar úmido da Escola de Física e Química em Paris, alguns instrumentos de detecção, incluindo alguns construídos por Pierre e seu irmão, Jacques. Usando um eletroscópio e, mais tarde, o seu novo piezoelétrômetro, o casal Curie conseguiu medir tais radiações, afirmando que eram uma propriedade intrínseca do elemento urânio. Sua intensidade era proporcional à quantidade de urânio presente na substância, não dependendo da combinação química, da fase de agregação, nem das condições exteriores.

O casal Curie descobriu ainda que o urânio não era o único elemento que apresentava essa propriedade. Os sais de tório emitiam radiações semelhantes.

Como resultado de todo esse longo trabalho, iniciado pelo físico alemão Röntgen, que teve prosseguimento com os trabalhos de Becquerel e de Pierre e Marie Curie, nasceu o estudo do fenômeno da radioatividade. Por suas descobertas, Becquerel, Pierre e Marie Curie foram laureados com o prêmio Nobel de Física em 1903.

Pierre e Marie Curie foram ainda mais longe: em uma comunicação à Academia de Ciências, em 12 de abril de 1898, anunciaram que a *pechblenda* – um minério contendo óxido de urânio – era bem mais radioativa que o urânio metálico isolado. Isso significava que o minério continha, além do urânio, outro elemento radioativo. Conseguiram do governo austríaco uma tonelada de *pechblenda*, proveniente das minas de Joachimstal e, em julho de 1898, anunciaram que haviam conseguido isolar da *pechblenda* um metal que, na tabela periódica, seria vizinho do bismuto. Em homenagem à pátria de Marie, este novo elemento foi chamado de polônio. No final do mesmo ano, anunciaram a descoberta de outro elemento radioativo isolado da *pechblenda* – o rádio.

Marie Curie passou mais quatro anos trabalhando com a *pechblenda*, até conseguir isolar uma quantidade significativa de rádio, determinar a massa atômica (226) e algumas de suas propriedades, como o fato de ser 1,4 milhões de vezes mais radioativo que o urânio. Em 1911, recebeu seu segundo Nobel, agora de Química, por essas últimas descobertas.

Pierre Curie morreu, tragicamente, em 1906, após ter sido atropelado. Marie Curie morreu de leucemia com 67 anos, em 4 de julho de 1934, provavelmente vítima das radiações a que ficara exposta durante grande parte de sua vida.

### A descoberta da radioatividade artificial

Em janeiro de 1934, o casal Irène Curie e Frédéric Joliot, filha e genro de Marie Curie, respectivamente, descobriram a radioatividade artificial. Através do bombardeamento de uma folha de alumínio-27 com partículas  $\alpha$ , observaram a criação de um novo isótopo radioativo, ou radioisótopo, o fósforo-30. Este experimento mostrou ser possível fabricar radioisótopos que não existiam na natureza, através do bombardeamento de um núcleo estável. Por esta descoberta, foram laureados em 1935 com o prêmio Nobel de Química<sup>9,10</sup>.

### A descoberta do nêutron

Nos anos 20, Rutherford, na Inglaterra, W. D. Harkins, nos EUA, e Orme Masson, na Austrália, propuseram, de forma independente, a possível existência de uma outra partícula, sem carga, que chamaram de “nêutron”, que resultaria da combinação de um elétron (negativo) e um próton (positivo). Somente em 1932, James Chadwick, na Inglaterra, comprovou a existência do nêutron, após irradiação de uma folha de berílio com partículas  $\alpha$ , oriundas do decaimento do polônio<sup>11,12</sup>.

### A descoberta do pósitron

Prevista teoricamente por P. A. M. Dirac em 1928, foi comprovada a existência do “elétron positivo” por C. D. Anderson em 1932, em estudos das interações dos raios cósmicos em uma câmara de nuvens (“cloud chamber”), que também sugeriu o nome “pósitron” para esta nova entidade. O pósitron, similar às partículas  $\alpha$  e  $\beta$ , é encontrado nas desintegrações de radionuclídeos artificiais<sup>12</sup>.

### A descoberta da fissão nuclear

Por volta de 1934, o físico italiano Enrico Fermi notou que o bombardeamento do núcleo de certos átomos com nêutrons de velocidade moderada fazia com que o núcleo capturasse o nêutron. Isso levou Fermi a concluir que o bombardeamento do urânio ( $Z=92$ ) com nêutrons moderados deveria produzir elementos transurânicos ( $Z>92$ ), até então desconhecidos. Ele e sua equipe fizeram algumas experiências nesse sentido, sem isolar nenhum elemento novo<sup>13</sup>.

Realizando experiências similares, os químicos Otto Hahn e Fritz Strassmann, em 1938, detectaram a presença de bário ( $Z=56$ ), após o bombardeamento do urânio com nêutrons moderados. A explicação para o fato foi dada por uma cientista da equipe, a física austríaca Lise Meitner, e por seu sobrinho, o físico Otto R. Frisch: “O núcleo do átomo de urânio é instável e, ao ser bombardeado com nêutrons moderados, rompe-se praticamente ao meio, originando dois núcleos de massa média e liberando 2 ou 3 nêutrons, além de mais energia”. A esse fenômeno foi dado o nome de fissão nuclear<sup>14</sup>.

Durante muitos anos, Meitner foi indicada para o prêmio Nobel, mas nunca recebeu essa homenagem. Mas, em 1998, a IUPAC confirmou o nome Meitnério para o elemento 109. Alguns consideram essa homenagem maior e mais justa que um Nobel<sup>17</sup>.

## OUTROS MARCOS NA HISTÓRIA DA RADIOATIVIDADE

### O projeto Manhattan<sup>15-17</sup>

O desenvolvimento da indústria nuclear começou com a Segunda Guerra Mundial. Em uma carta ao presidente Franklin Roosevelt enviada em agosto de 1939, o físico Albert Einstein, ganhador do Prêmio Nobel de física em 1921, afirmava que os EUA deveriam priorizar o desenvolvimento de uma bomba baseada em energia nuclear, antes que os alemães a fizessem, pois já estavam tentando purificar o <sup>235</sup>U. Dessa forma, em outubro de 1939, Roosevelt autorizou o governo a custear a pesquisa atômica através da “Advisory Committee on Uranium”, presidida por Lyman Briggs. Em fevereiro de 1940, esta comissão concedeu a Enrico Fermi e Leo Szilard um contrato para iniciar a construção de uma pilha nuclear (um tipo de reator nuclear subcrítico), na Universidade de Columbia.

Na Universidade de Chicago, Arthur Compton observava o progresso da pesquisa com grande interesse, pois tinha por objetivo estabelecer um laboratório de pesquisa em física atômica naquela universidade. Usando seus contatos com importantes cientistas, Compton assegurou a participação da Universidade de Chicago nas pesquisas pioneiras sobre energia nuclear.

Compton também estava determinado a concentrar os estudos de reação em cadeia em um único lugar. Assim, Fermi e Szilard, junto com Eugene Wigner, Glenn Seaborg e vários outros pesquisadores juntaram-se na Universidade de Chicago, para comprovar a viabilidade da reação nuclear auto-sustentável. Para isto, empilharam blocos de grafite intercalados com barras de urânio natural metálico, purificado, em uma velha quadra de “squash”, em baixo do estádio “Stagg Field” da Universidade de Chicago. Dessa forma, em

dezembro de 1942, surgia o primeiro reator nuclear auto-sustentável, chamado de “Chicago Pile 1” (CP-1).

Nesse mesmo ano, surgia o “Projeto Manhattan”, que tinha por objetivo desenvolver e construir armas nucleares. Tal projeto foi assim chamado por estar ligado ao Distrito de Engenharia de Manhattan, do Exército dos EUA, e porque boa parte da pesquisa inicial foi realizada neste distrito da cidade de Nova York.

O sucesso não tardou e, no dia 16 de julho de 1945, no estado do Novo México nos EUA, a primeira bomba atômica da história, conhecida como “Gadget”, foi detonada. J. R. Oppenheimer foi o responsável por convidar um grupo de cientistas americanos, junto com alguns refugiados europeus, para Los Alamos, e dirigir o projeto. Esta bomba era composta de duas pequenas bolas de plutônio, recobertas por níquel e em cujo centro estava um núcleo de berílio e urânio. A explosão experimental, chamada “Trinity”, foi produzida pela união das duas bolas por explosivos convencionais (“implosão”) e aconteceu no meio do deserto do Novo México, a cerca de 100 km da cidade de Alamogordo, região habitada apenas por formigas, aranhas, cobras e escorpiões.

### Hiroshima e Nagasaki<sup>15,18,19</sup>

Na manhã de 6 de agosto de 1945, em Hiroshima, Japão, um avião americano B-29, chamado Enola Gay, soltou uma bomba atômica denominada “Little Boy”, que detonou 580 m acima do centro da cidade. “Little Boy”, assim chamada em alusão a Franklin Roosevelt, tinha 3,2 m de comprimento, 74 cm de diâmetro, pesava 4,3 t e tinha uma potência equivalente a 12,5 mil t de TNT, provido de uma bala de 2,26 kg de <sup>235</sup>U, disparada em um alvo de 7,71 kg de <sup>235</sup>U. Quando as duas peças se encontram, ocorre uma reação em cadeia. Como resultado do ataque, pela liberação intensa de calor e ocorrência de incêndios, a cidade de Hiroshima foi destruída e 90 mil pessoas morreram naquele mesmo dia.

Três dias após destruir Hiroshima, outro avião B-29 atacou a cidade de Nagasaki. A bomba utilizada, chamada de “Fat Man” em alusão a Winston Churchill, consistia de dois hemisférios de plutônio unidos por explosivos convencionais, tinha 3,25 m de comprimento e 1,52 m de diâmetro, pesava 4,5 t e tinha uma potência equivalente a 22 mil t de TNT. O ataque resultou em mortes imediatas de 40 mil pessoas. As conseqüências não foram maiores porque o terreno montanhoso protegeu o centro da cidade. Os estragos materiais foram menos arrebatadores que em Hiroshima, mas, 12 h depois, era visível o fogo em Nagasaki, a mais de 320 km de distância. Nagasaki, na verdade, era o objetivo secundário; foi atingida porque as condições meteorológicas de Kokura, o alvo principal, impediriam que os efeitos destrutivos da bomba fossem verificados.

Até o final de 1945, 145 mil pessoas tinham morrido em Hiroshima e 75 mil em Nagasaki. Milhares de pessoas sofreram ferimentos sérios. Devido aos efeitos da radiação, várias mortes ocorreram nos anos seguintes, e causaram também nascimentos de bebês com má formação genética.

A maioria das vítimas afetadas pelas bombas atômicas de Hiroshima e Nagasaki era civil, sendo que aquelas que estavam mais próximas do epicentro das explosões foram incineradas, enquanto que as mais distantes receberam a radiação em altas doses, o que provocou mortes dolorosas. Mesmo hoje, mais de seis décadas após o ataque com bombas nucleares, os sobreviventes ainda sofrem com as lembranças dos ataques.

Assim como as pessoas e as estruturas físicas das duas cidades sofreram conseqüências graves com a radiação das bombas atômicas, o meio ambiente também foi inteiramente afetado.

A ação americana foi considerada por alguns como uma demonstração desnecessária de crueldade contra a população civil japonesa.

O governo dos Estados Unidos justificou-se, alegando que essa era a forma mais rápida de encerrar, de uma vez por todas, a Segunda Guerra Mundial. Mesmo após seis décadas, este debate continua.

### O acidente de Windscale

Em 1957, fogo em um reator moderado por grafite e resfriado por gás carbônico permitiu a liberação de mais de 700 terabequeréis ( $700 \times 10^{12}$  Bq) de radionuclídeos, principalmente <sup>131</sup>I e <sup>137</sup>Cs. Por um período, a venda de leite oriundo dos rebanhos locais foi proibida. Felizmente, devido ao decaimento natural da radiação depositada, a terra hoje não apresenta contaminação detectável<sup>1</sup>.

### O acidente de Three Mile Island

Em março de 1979, a usina nuclear americana de Three Mile Island, na Pensilvânia, foi local de um acidente nuclear causado por falha de equipamento e erro operacional em avaliar as condições do reator. A falha de equipamento causou uma perda gradual de água de resfriamento no núcleo do reator, o que resultou em fusão parcial das varetas do elemento-combustível, com liberação de material radioativo no interior do edifício, inclusive gases, principalmente Xe, Kr e traços de iodo, também liberados à atmosfera. Nenhuma radioatividade foi encontrada depositada no solo. Embora não tenham sido registradas doenças ou mortes devido a este acidente, gerou grande preocupação em relação à segurança das usinas nucleares de potência por parte do público norte-americano. Como resultado, nenhum novo reator de potência foi instalado nos EUA desde este período<sup>20</sup>.

### O acidente nuclear de Chernobyl

Em 26 de abril de 1986, ocorreu o mais grave acidente nuclear da história, em Chernobyl, na atual Ucrânia. A explosão de um dos quatro reatores da usina nuclear soviética de Chernobyl, localizada a 129 km ao norte de Kiev, lançou na atmosfera uma nuvem radioativa de  $3,7 \times 10^{18}$  Bq, desencadeada por uma reação em cadeia fora de controle. A força da explosão liberou uma nuvem radioativa que atingiu a parte oeste da antiga União Soviética, hoje os países de Belarus, Ucrânia e Rússia, e todo o norte e centro da Europa<sup>21,22</sup>.

Três dias após a explosão, nenhum comunicado ainda havia sido feito pelo governo soviético a respeito do acidente nuclear em Chernobyl. As autoridades soviéticas só assumiram o ocorrido após o governo da Suécia ter detectado altos níveis de radiação no sul de seu país, correlacionando com a direção do vento, e ter anunciado que um grave acidente havia ocorrido em algum lugar da União Soviética. Um satélite americano varreu a região da Ucrânia, encontrando uma usina com o teto destruído e o reator ainda em chamas, com fumaça vertendo do interior. Mas, Mikhail Gorbáchev, então presidente, demorou 18 dias para comentar o acidente, só o fazendo em 14 de maio<sup>22</sup>. O total oficial de mortos diretamente relacionado ao acidente no reator foi de 31 pessoas, devido à participação direta no combate aos incêndios da unidade. Outros 237 trabalhadores foram hospitalizados com sintomas da exposição aos altos níveis da radiação ao redor do reator. Muitas destas vítimas apresentaram queimaduras e outros tipos de lesões<sup>21</sup>.

Mais de 40 radionuclídeos diferentes escaparam do reator em conseqüência do incêndio nos primeiros 10 dias após o acidente, entre eles elementos e compostos altamente voláteis, como iodo (I-131), sais de céσιο (Cs -137) e estrôncio (Sr-90). Céσιο radioativo, com meia-vida de 30 anos, foi o isótopo disperso mais perigoso, tendo contaminado uma região entre 125.000 e 146.000 km<sup>2</sup> <sup>22</sup>.

Baseado em dados oficiais, estima-se que 8.400.000 pessoas em Belarus, Ucrânia e Rússia foram expostas à radiação. Aproximada-

mente 155.000 km<sup>2</sup> do território desses três países foram contaminados, o que equivale a quase metade do território total da Itália<sup>22</sup>. Na Ucrânia, 35.000 km<sup>2</sup> de florestas foram contaminadas, 40% do total<sup>23</sup>.

Com a ajuda de helicópteros, começou-se a jogar sobre o reator toneladas de uma mistura de areia, argila, dolomita (bicarbonato de cálcio e magnésio), boro e chumbo. Após a extinção das chamas, a unidade 4 do reator foi selada com aço e concreto, através da construção de paredes externas e de um teto, sob a forma de uma tampa. Apesar disso, essa estrutura não é resistente e atualmente há planos para sua reconstrução. Aproximadamente 200.000 pessoas (“liquidators”) de todas as partes da antiga URSS se envolveram no trabalho de cobertura e limpeza do local da explosão, recebendo altas doses de radiação. Em abril de 2002, a Comissão de Segurança Radiativa do governo ucraniano informou que os níveis de radioatividade em Chernobyl estavam aumentando. O sarcófago de concreto em que é mantido o que resta do combustível nuclear da usina estava, inclusive, tendo aumento em sua temperatura<sup>24</sup>.

Após 36 h do acidente, toda a população de Pripjat, cidade onde moravam os trabalhadores do complexo de reatores, começou a ser evacuada, alcançando um raio de 10 km da planta da usina. Em 4 de maio, foi feito um cerco em um raio de 30 km (2.800 km<sup>2</sup>) ao redor de Chernobyl, conhecido como zona de exclusão, o que elevou o número de evacuados para 116.000. Nos anos seguintes ao acidente, a zona de exclusão foi modificada e estendida para 4300 km<sup>2</sup><sup>24</sup>.

Além das mortes diretamente ligadas ao acidente, verifica-se um aumento comprovado e contínuo no número de casos de câncer, principalmente de tireóide, especialmente nas pessoas que eram crianças ou jovens na época do acidente. Parte deste problema foi relacionado à falha do governo da União Soviética em não admitir a ocorrência do acidente em tempo hábil, impedindo assim a distribuição de comprimidos de iodo de potássio, que é a melhor maneira de se evitar a presença de iodo radioativo na tireóide. Tais comprimidos foram distribuídos na Polônia e outros países da Europa, fazendo com que nesses lugares, o número de casos de câncer relacionados ao acidente de Chernobyl tenha sido desprezível.

Outra consequência, ainda presente, é a distribuição da radioatividade pelo efeito das chuvas e inundações da primavera, quando a neve derrete. O material radioativo ainda presente no solo da zona de exclusão pode se espalhar ainda mais, através da erosão pelo vento, incêndios na floresta e transporte pelos rios<sup>23</sup>.

As lições que puderam ser aprendidas com o acidente foram numerosas e em várias áreas, incluindo a segurança do reator e administração em caso de acidentes severos, critérios de intervenção, procedimentos de emergência, comunicação, tratamento médico das pessoas irradiadas, métodos de monitoramento, processos radioecológicos, supervisão da região e da agricultura, informação pública, etc<sup>25</sup>.

De qualquer forma, a lição mais importante foi a de que provavelmente um acidente nuclear grave teria implicações não só *in loco* ou em países vizinhos, mas suas consequências poderiam afetar, direta ou indiretamente, muitos países, a grandes distâncias do local do acidente. Por isso, foi estabelecido um esforço extraordinário para expandir e reforçar a cooperação internacional em diversas áreas, tais como a comunicação, harmonização dos critérios de administração de emergência, informação, coordenação de ações protetoras e mecanismos internacionais de cooperação<sup>25</sup>.

Muitos países foram induzidos a estabelecer planos de emergência, nas áreas científicas e técnicas, junto a novas pesquisas com relação à segurança nuclear, especialmente no gerenciamento de acidentes nucleares sérios. Este novo clima levou à expansão dos conhecimentos sobre os efeitos prejudiciais da radiação e seus tratamentos médicos, além de revitalizar a pesquisa radioecológica e programas de monitoramento ambiental. Foram alcançados melhoramentos substanciais na definição dos critérios e métodos para in-

formar o público, um aspecto cuja importância foi particularmente evidenciada durante o acidente e seus resultados<sup>25</sup>.

Outra lição, de importância política, diz respeito à reclamação das terras contaminadas. A contaminação, particularmente em meios florestais, tende a alcançar uma estabilidade ecológica. Inicialmente, pensou-se que os níveis de radiação declinariam devido a processos de remoção natural, porém, isto não provou ser a regra. Pelo fato da persistência de contaminação, a importância do envolvimento da parte interessada no desenvolvimento de projetos relacionados à vida em territórios contaminados foi destacada, sendo que as pessoas mais afetadas devem ser diretamente envolvidas nas decisões, para que as mesmas sejam aceitáveis no convívio com a contaminação<sup>25</sup>.

De qualquer modo, a comunidade internacional demonstrou uma notável capacidade de aprender e estimar as lições extraídas deste evento, de modo que estará mais bem preparada para lidar com desafios futuros desta natureza, de uma forma mais flexível<sup>25</sup>.

## O acidente radioativo de Goiânia<sup>6,26</sup>

Em 13 de setembro de 1987, uma cápsula de cézio-137, abandonada há 2 anos nos escombros do antigo Instituto Goiano de Radiologia (IGR) – desativado depois de sofrer uma ação de despejo – foi removida por dois sucateiros, violada e vendida como ferro-velho. Entre a retirada da cápsula da clínica em ruínas e a descoberta do fato pelas autoridades, dezenas de moradores de Goiânia conviveram com um material radioativo cuja periculosidade era desconhecida. Atraídos pela intensa luminescência azul do sal do cézio-137, adultos e crianças o manipularam e distribuíram entre parentes e amigos. Os primeiros sintomas da contaminação (náuseas, vômitos, tonturas e diarreia) apareceram algumas horas após o contato com o material. O saldo dessa experiência foi a morte de 4 pessoas, a amputação do braço de outra e a contaminação, em maior ou menor grau, de mais de 200 pessoas. Um complexo encadeamento de fatos resultou na contaminação de três depósitos de ferro-velho, e diversas residências e locais públicos. As pessoas contaminadas procuraram farmácias e hospitais, sendo posteriormente medicadas como vítimas de alguma doença infecto-contagiosa.

Somente em 29 de setembro, aqueles sinais foram identificados como característicos da síndrome da radiação. Alguns pacientes já tinham sido recebidos pelo Hospital de Doenças Tropicais de Goiânia (HDT) e um dos médicos consultou a Secretaria de Saúde de Goiás, cabendo ao físico Walter M. Ferreira, que ali trabalhava, dar o alarme. Ferreira obteve da agência local da NUCLEBRÁS um cintilômetro e foi até a sede da Vigilância Sanitária, onde uma peça da cápsula tinha sido posta sobre uma cadeira; o medidor confirmou a hipótese, ali estava a origem de tudo. Com esta evidência, desencadeou-se uma grande operação para tratar as pessoas contaminadas com o <sup>137</sup>Cs, avaliar a extensão da contaminação e, posteriormente, remover todos os traços da radioatividade dos locais contaminados. Este procedimento foi realizado com sucesso, sob a supervisão de funcionários da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

## ENERGIA NUCLEAR

### Reatores de potência

Os primeiros reatores nucleares foram construídos com a finalidade de produzir o plutônio-239, a partir da reação de um nêutron com o urânio-238, para uso em bombas atômicas. Por outro lado, desde a comprovação da reação nuclear auto-sustentável controlada, o uso da energia produzida pela reação nuclear para a produção de energia elétrica foi considerado plausível. Inúmeros conceitos para tais reatores de potência foram propostos, com diferentes modelos sendo construídos. Alguns, como os de água pressurizada,

ênfaticamente a produção de energia, enquanto outros, por ex., os com moderador de grafite, têm a dupla função de produzir energia elétrica com um rendimento maior de plutônio (combustível para a fabricação de bombas de fissão)<sup>1</sup>.

O desenvolvimento da indústria de reatores de potência foi acelerado a partir da crise do petróleo em 1973, para diminuir a dependência energética dos países ocidentais em relação ao mundo árabe<sup>15</sup>. Atualmente, 18% da eletricidade consumida no mundo é proveniente de reatores nucleares (principalmente nos Estados Unidos, Rússia, França e Japão), sendo que cerca de 438 reatores de grande porte estão em funcionamento. A eletricidade produzida em usinas hidroelétricas, no mundo todo, é também aproximadamente de 18%. O restante é gerado pela queima de carvão, gás natural e derivados de petróleo<sup>27</sup>.

### Usinas nucleares no Brasil

Os primeiros trabalhos registrados no Brasil em pesquisa científica nuclear datam de 1934, na Universidade de São Paulo, com a entrada de cientistas estrangeiros que formaram os primeiros físicos voltados ao estudo da constituição básica da matéria. Nos anos seguintes, foram feitas pesquisas em São Paulo e na Guanabara (então Distrito Federal), quando muitos estudantes brasileiros foram se especializar no exterior, criando posteriormente centros de pesquisas nacionais nesta área<sup>15</sup>.

No Brasil, o programa nuclear teve início em 1969, quando o governo assinou contrato com a “NUS Corporation”, para assessoramento na implantação de uma usina nuclear. Em junho de 1970, Furnas convidou empresas estrangeiras para propor a instalação da nova usina nuclear e, no ano seguinte, os projetos foram analisados. A usina de Angra I, do tipo água pressurizada, foi comprada da Westinghouse (EUA), com capacidade de produção de 626 MW (5% da capacidade instalada de Itaipu), sem haver transferência de tecnologia. A usina foi instalada em Angra dos Reis na praia de Itaorna, que significa “pedra-podre” em tupi-guarani. Angra I foi apelidada de “vagalume”, tal é a incidência de problemas técnicos que obriga que seja desligada com uma frequência maior que a normal<sup>15</sup>.

Em 1975, o Brasil assinou um acordo nuclear com a Alemanha, através da Siemens. Previa-se, inicialmente, a construção de oito usinas, com transferência de tecnologia. Apenas as obras de Angra II e III foram iniciadas e somente a usina Angra II foi concluída<sup>15,28</sup>. Angra II começou a operar somente em 2000<sup>15,29</sup>, após quase 20 anos de construção, a um custo de cerca de US\$ 10 bilhões. O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), através da resolução nº 8 de 17 de Setembro de 2002, autorizou a Eletronuclear a adotar as medidas necessárias à retomada do empreendimento de Angra III<sup>28</sup>.

### A energia nuclear e o meio científico

Para se ter um panorama geral de como a comunidade científica tem se portado com relação ao emprego da energia nuclear nas diferentes áreas do conhecimento, foi realizada uma pesquisa na “Web of Science”<sup>30</sup>, com algumas palavras-chave (Figura 1).

Analisando esta figura, é possível notar que os números relativos de publicações científicas na área de interesse deste trabalho têm aumentado após o acidente de Chernobyl, ocorrido em 1986. Ainda se pode observar que, com exceção do uso da energia nuclear como a terceira fonte de energia (comparada aos combustíveis), o avanço nas pesquisas ocorreu exatamente a partir de 1987, o que parece estar de acordo com o avanço da tecnologia. Também é interessante ressaltar que, atualmente, a medicina nuclear é a área que mostra o maior interesse na utilização da energia nuclear, seguida da área química e, por fim, da área física. De qualquer forma, seria conveniente chamar

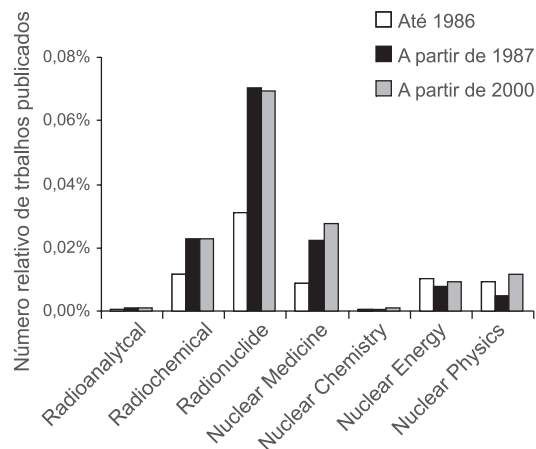


Figura 1. Pesquisa realizada na “Web of Science” em setembro de 2004, utilizando as palavras-chave descritas no gráfico acima

a atenção da população mostrando o avanço da ciência no que diz respeito ao uso da radiação e energia nuclear, deixando de lado a burocracia, que pode estar impedindo avanços tecnológicos, por má interpretação de informações e uso inadequado dessas técnicas.

## APLICAÇÕES DA RADIAÇÃO E RADIOATIVIDADE

### Considerações gerais

Pode-se dizer que a potencialidade do uso de radiação, radionuclídeos e energia nuclear foi marcada por alguns períodos. O primeiro período de estudo da radioatividade é direcionado estritamente à descoberta de novos elementos radioativos e ao entendimento das leis principais que regem o comportamento das espécies radioativas. No segundo período, que engloba os anos 40 a 50, as investigações radioquímicas foram focalizadas para utilização prática da energia nuclear, estudo das propriedades químicas dos elementos artificialmente obtidos<sup>12</sup>, desenvolvimento de tecnologia de processamento de energia nuclear como combustível e resolução de problemas ligados a aterros de lixo radioativo<sup>31</sup>. Pode-se dizer que estes aspectos ainda estão em constante estudo, embora outros também tenham surgido, como será abordado mais adiante.

Nos anos 50, o desenvolvimento intenso da técnica analítica baseada na análise por ativação com nêutrons foi fortemente estimulado, devido à necessidade de se empregar novos materiais para a tecnologia nuclear (carbono de alta pureza, berílio, zircônio e outros). Considerando a tecnologia em desenvolvimento naquele período, a análise por ativação com nêutrons propiciou a detecção de impurezas nestes materiais, devido a sua maior detectabilidade, em comparação aos métodos analíticos convencionais. Nos anos 60 a 70, foi dada atenção especial para a análise de diferentes semicondutores (germânio, gálio, telúrio, entre outros), que são empregados em detectores e materiais geológicos<sup>31</sup>.

A partir dos anos 60, observa-se uma gradual conscientização das conseqüências do uso da matéria radioativa. A atenção principal foi voltada para o desenvolvimento sustentável, incluindo alguns aspectos: recuperação de territórios poluídos, estudo dos radionuclídeos naturais, redução da quantidade inevitável de lixo radioativo (para a tecnologia nuclear atual) e desenvolvimento de tecnologia para estocagem de lixo radioativo por um longo prazo<sup>31</sup>.

As inúmeras aplicações da radioquímica estão correlacionadas com o emprego dos radionuclídeos como ferramentas em análises e controle de processos. As razões para o uso desta tecnologia são uso econômico de materiais puros e melhorias na segurança

operacional. Estes fatores foram válidos desde aproximadamente os anos 50. No entanto, a partir do final da década de 70, percebe-se a estagnação no desenvolvimento de novas aplicações. Vogg<sup>32</sup> acredita que houve um ceticismo generalizado, no qual o emprego da radioatividade foi relacionado a algo sem propósito. Além disso, o autor acredita que a dificuldade maior para emergir se deveu muito mais à necessidade de melhoria nos sistemas de medidas das técnicas. Isto foi atribuído ao fato de que as medidas estavam restritas muitas vezes às condições de operação, como ex., temperatura e falta de estabilidade por tempos longos.

Nos dias de hoje, a maioria destes problemas foi sanada e uma ampla faixa de aplicações de radiação e radiatividade é encontrada na literatura. Alguns exemplos são apresentados nos parágrafos a seguir.

## Medicina

Como já foi observada na Figura 1, uma das grandes áreas que mostram o uso de radiação e material radioativo é a medicina. Um dos ramos da medicina nuclear é chamado de cintilografia, uma das grandes tendências atuais. A cintilografia pode ser considerada como uma das técnicas mais eficientes para obtenção de diagnóstico de patologias, por avaliar o funcionamento fisiológico de determinadas estruturas, diferentes das demais (radiografia, tomografia, ultrasonografia)<sup>33</sup>. A técnica de investigação por imagens geralmente emprega a chamada Câmara Gama, para detectar a radiação  $\gamma$  proveniente das substâncias radioativas (chamadas de “traçadores”), que são ingeridas pelos pacientes e atraídas para órgãos específicos. A detectabilidade avançada permite observar alterações na função de órgãos, antes mesmo que o problema esteja em estágio muito avançado. Hoje, os radiofármacos usados em medicina nuclear no Brasil são, em grande parte, produzidos pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), da CNEN<sup>34</sup> em São Paulo.

A medicina nuclear concentra uma variedade de exames que podem ser feitos através da aplicação do material radioativo, sendo que os radionuclídeos <sup>99m</sup>Tc e o <sup>125</sup>I são os mais frequentemente utilizados. <sup>111</sup>In, <sup>201</sup>Tl, <sup>18</sup>F, <sup>67</sup>Ga, <sup>11</sup>C, entre outros também são empregados<sup>35</sup>. Os diagnósticos mais comuns são localização e acompanhamento do desenvolvimento de câncer, principalmente de mama e próstata; controle evolutivo em tratamentos cirúrgicos; estudos de áreas cardíacas isquêmicas, ventilação e perfusão pulmonar; pesquisas de nódulos tireoidianos, infecções e lesões do sistema músculo-esquelético, focos epilépticos e diagnóstico de morte cerebral. As cintilografias mais comuns são: óssea, pulmonar, de perfusão miocárdica, cerebral, de tireóide, hepato-esplênica, vias biliares, vias linfáticas, lacrimais, pesquisa de hemorragias digestivas, refluxo gastro-esofágico, esvaziamento gástrico, renal estática, renal dinâmica, avaliação de transplante renal e pesquisa de infecções. Até mesmo o corpo inteiro pode ser monitorado através de cintilografia<sup>35,36</sup>.

Um trabalho recente mostra a versatilidade da técnica de cintilação<sup>37</sup>, no qual é feito um monitoramento dos efeitos do PEG (polietilenoglicol) sobre a polietilenimina (PEI), empregando imagem nuclear com uma câmera gama e o radioisótopo <sup>99m</sup>Tc, considerando que a PEI é um agente extensivamente investigado como antivírus. Nesse caso, o estudo revela uma melhoria na especificidade do marcador com o aumento de substituições do PEG na PEI, além de proporcionar estudos de otimização, visando minimizar interações não específicas.

Em 2004, Courtyrn e colaboradores<sup>38</sup> sintetizaram e avaliaram a [<sup>11</sup>C]-acetilomotaurina como um novo agente de imagens para o estudo de propriedades farmacodinâmicas, ilustrando assim o comportamento fisiológico de fármacos. Os autores apresentaram o uso do <sup>11</sup>C como radionuclídeo marcador, o que não é tão trivial quanto o uso de <sup>131</sup>I e <sup>99</sup>Tc, devido a sua meia-vida de apenas 20 min. Além disso, enfatizaram a busca por novos agentes de imagens, especifi-

cos para determinados ligantes. Essas descobertas trazem avanços significativos para a medicina, no que diz respeito a diagnósticos mais eficientes, considerando a seletividade. De qualquer forma, inovações importantes estão em constante aperfeiçoamento no que se refere ao avanço do uso de radionuclídeos e radiação ionizante voltada para área médica.

A radioterapia teve origem na aplicação do elemento rádio pelo casal Curie, para destruir células cancerosas, e foi inicialmente conhecida como “Curiterapia”<sup>26</sup>. Posteriormente, outros radioisótopos passaram a ser usados, apresentando um maior rendimento. Sempre existiu uma grande preocupação em reduzir a quantidade e o poder de penetração da radiação utilizada, devido principalmente à grande controvérsia que envolve a radiação, que ora é a causadora de doenças e ora é utilizada no tratamento terapêutico dessas mesmas doenças.

Nesse contexto, uma aplicação muito interessante do radionuclídeo <sup>90</sup>Y<sup>3+</sup>, na forma de [<sup>90</sup>Y-DOTA<sup>0</sup>,Tyr<sup>3</sup>]octreotide (OctreoTher<sup>®</sup>), está descrita no trabalho realizado por Breeman e colaboradores<sup>39</sup> que visa redução do acúmulo de radionuclídeos em ossos. Pacientes que se submetem a determinadas doses de radiação, geralmente maiores que  $3 \times 10^{10}$  Bq, podem acumular radioisótopos nos ossos. A presença de DTPA (dietileno-triamina-pentacetato) nas soluções injetadas possibilitou a excreção desse elemento com cinética longa, evitando assim seu acúmulo nos ossos. Isso ressalta a complexidade que existe nos estudos dos métodos terapêuticos baseados em radionuclídeos, que devem também ter atenção voltada para a forma e velocidade de eliminação desses isótopos.

Recentemente, Kato e colaboradores<sup>40</sup> relataram resultados dos primeiros estudos envolvendo íons carbono acelerados para atuar em carcinomas hepáticos, como em sessões de radioterapia, salientando a importância do uso desse elemento que se mostra seguro e eficiente. De qualquer forma, o grande mérito desse artigo está voltado para uma nova alternativa na radioterapia, baseada em elementos não radioativos. A partícula acelerada tem se mostrado promissora, considerando os resultados alcançados nesse trabalho, de forma que o método se apresentou bastante eficiente na destruição do carcinoma estudado.

## Química

Considerando o uso da radioatividade em diferentes áreas da química, é interessante ressaltar novamente a ambigüidade do termo, voltada aqui para a contradição: contaminação *versus* uso em técnicas analíticas.

No que se refere à contaminação por elementos radioativos, a tendência atual em química e, mais especificamente em química analítica, é a descoberta e monitoramento de contaminação e o desenvolvimento de métodos e aperfeiçoamento de técnicas que visem a determinação de radioisótopos com segurança no laboratório.

No que se refere à segurança destes laboratórios, é interessante comentar o trabalho de Arikan e colaboradores<sup>41</sup>, que estão propondo o estabelecimento de um sistema de qualidade para laboratórios analíticos nucleares. Hoje, nos programas de controle e garantia de qualidade, é considerada uma política de qualidade, organização, métodos e registros de laboratórios analíticos nucleares, necessários para melhorar a produtividade, performance, credibilidade e reputação desses laboratórios. Nesses casos, segue-se um manual de qualidade e trabalha-se de acordo com a ISO 17025, com fiscalização externa, seja de clientes ou de auditores. Os autores estabelecem um sistema modelado no projeto da Agência Internacional para Energia Atômica (IAEA), que possibilita uma auto-avaliação de segurança, qualidade e credibilidade pelo próprio corpo nacional. Isto parece ser de grande valia para a comunidade de energia nuclear. Entretanto, ainda deve ser bastante discutido antes

de ser implementado, principalmente em países que aparentam não ter maturidade suficiente para lidar com este novo tipo de regra.

Considerando agora o aspecto da contaminação por radionuclídeos, recentemente, no Brasil, foi detectada uma região de alta exposição a radônio, Rn, em minas de carvão<sup>42</sup>. As medidas das concentrações desse elemento e das de seus produtos de decaimento alfa foram feitas diretamente dentro das minas, de modo a estimar a estequiometria do Rn no ambiente de estudo. Para isso, foi utilizado um monitor portátil, sensível para partículas alfa, ressaltando nesse trabalho as grandes vantagens em se desenvolver técnicas que permitam a realização de análises *in situ*. Os trabalhadores e as minas de carvão foram monitorados com o auxílio de dosímetros e os resultados da pesquisa mostraram que todos os valores obtidos, considerando os resultados desta análise, estão acima dos valores recomendados pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica. Dessa forma, fica evidente que o Brasil necessita de uma melhor avaliação destas áreas de risco, principalmente no que se refere à prevenção da contaminação por radioatividade. Isto é muito importante, se considerarmos que a população brasileira apresenta uma tendência contrária ao uso da energia nuclear, aparentemente estar a par dos acontecimentos e inovações do uso dessa forma de energia. Neste caso, os autores mostraram o desconhecimento e despreocupação dos órgãos do Brasil com relação a este tipo de contaminação, que atinge vários trabalhadores. Este fato provavelmente se estende a outros problemas originados pela exposição a radioisótopos naturais.

Ainda nesse contexto, é interessante citar o trabalho de Maslov e colaboradores<sup>43</sup>, que visa a quantificação de Th em amostras de solos, usando a reação nuclear e a espectrometria de raios-X. O referido estudo foi baseado na necessidade de quantificação desses elementos radioativos de meia-vida ( $t_{1/2}$ ) longa. Neste estudo, foi mostrada uma das tendências da química radioanalítica atual, considerando que os métodos radioquímicos utilizados para quantificação de Th são pouco sensíveis e requerem várias horas ou dias para obtenção dos dados. Assim sendo, os mesmos autores propuseram um novo método de análise, altamente sensível, que emprega a radiação gama para gerar o  $^{231}\text{Th}$  a partir do  $^{232}\text{Th}$  e Fluorescência de Raios-X (XRF) para detecção do elemento. O grande mérito do trabalho está na simplicidade do procedimento proposto, que se baseia na evaporação da amostra em solução sobre um filme, seguida da etapa de irradiação com raios  $\gamma$  e quantificação do analito por XRF. Dessa forma, foi possível quantificar o elemento em amostras de referência, evidenciando que essa é uma alternativa viável para determinação de concentrações reais de tório em amostras de solo.

Vasconcelos e colaboradores<sup>44</sup>, em publicação recente, também relatam a aplicação da energia nuclear em química, voltada para análises ambiental e biológica. Essa publicação apresenta diferentes linhas de pesquisas que envolvem o uso de um reator nuclear, o de IPEN/CNEN-SP, construído especificamente para pesquisa baseada essencialmente em análises por ativação com nêutrons (NAA). A técnica proporcionou a determinação de vários elementos químicos em diferentes tipos de amostras, mostrando sua versatilidade. Foram obtidas informações valiosas a respeito de contaminações e doenças, de modo que a técnica se mostra adequada para muitas análises.

Abordando ainda o uso da análise por ativação com nêutrons como técnica radioanalítica, o trabalho de Steiness<sup>45</sup>, intitulado "Neutron activation analysis in the geosciences: Lost territory, or New Deal?", nos dá uma boa indicação de como está o uso e quais são as perspectivas da técnica. Os autores mencionam a necessidade de se usar NAA em certas análises e comentam principalmente suas vantagens. Ainda deixam claro que o fato da técnica ser baseada em princípios físicos propicia a obtenção de informações úteis e únicas, diferentemente de outras como ICP-MS, ICP-OES, AAS, etc. Isto, segundo os

autores, proporciona um futuro promissor para a NAA, principalmente por estar baseada em radioatividade, o que ao invés de ser considerado um ponto fraco é, o ponto chave da técnica.

Além destas, outras técnicas radioanalíticas também merecem destaque no que diz respeito à sua eficiência e importância para a comunidade analítica. Uma publicação de 2002 mostra a credibilidade em pesquisas que envolvem o aperfeiçoamento de técnicas radioanalíticas<sup>46</sup>. Os autores propõem uma hifenação entre técnicas. A aplicação estaria voltada para estudos ambientais, de alta especificidade para radionuclídeos, e ultratraços tóxicos. Este é um trabalho que merece atenção por incentivar adequadamente a complementaridade que deveria existir entre as técnicas analíticas, aproveitando as vantagens únicas que cada uma delas oferece, e não a competitividade que tem sido observada nos dias de hoje.

## Estudos de datação

O  $^{14}\text{C}$  resulta da absorção contínua dos nêutrons dos raios cósmicos pelos átomos de nitrogênio, nas altas camadas da atmosfera. Esse isótopo radioativo do carbono se combina com o oxigênio, formando o  $^{14}\text{CO}_2$ , que é absorvido pelas plantas durante a fotossíntese. Considerando que os animais se alimentam de plantas, todos os seres vivos terrestres mantêm um ciclo de  $^{14}\text{C}$  durante a vida, sendo que a incorporação só cessará com a morte do organismo. A partir desta, a quantidade de  $^{14}\text{C}$  começa a diminuir<sup>47</sup>.

Fósseis de madeira, papiros e animais contêm  $^{14}\text{C}$ , cuja meia-vida é de 5.730 anos. Isso significa que, a cada 5.730 anos, a atividade do  $^{14}\text{C}$  é reduzida à metade. Medindo-se a proporção de  $^{14}\text{C}$  que ainda existe nesses materiais, é possível saber a "idade" deles. Foi assim, por ex., que se determinou a idade dos Pergaminhos do Mar Morto<sup>47</sup>.

Desde 1950, quando o método de datação utilizando  $^{14}\text{C}$  foi colocado em prática, tornou-se a principal ferramenta para a determinação cronológica de 40 a 50.000 anos passados. Em 1960, o desenvolvimento desse método deu a Willard F. Libby o Prêmio Nobel em Química<sup>9</sup> e hoje é tão importante que se admite que muito dos estudos em cronologia na ciência arqueológica depende dos resultados de datação com o radioisótopo em questão.

Atualmente existem diversas aplicações desse radionuclídeo, de forma que a palavra radiocarbono já é bastante utilizada para designar o emprego de  $^{14}\text{C}$  em análises radioativas. Considerando esses aspectos, um trabalho de Scott e colaboradores<sup>48</sup> avaliou a precisão e exatidão das metodologias de datação com  $^{14}\text{C}$ . Os resultados obtidos, por comparação com métodos dendrocronológicos, mostraram-se mais eficientes, embora utilizem cálculos mais complexos.

Mendonça e Godoy<sup>49</sup> descreveram a utilização do  $^{14}\text{C}$  para estudos de arqueologia. O método proposto baseia-se no preparo da amostra, de forma que a detecção do  $^{14}\text{C}$  seja feita por absorção de  $\text{CO}_2$ . A contribuição deste trabalho se dá por sua simplicidade para a determinação do elemento, embora deva ser questionado o uso de técnicas destrutivas para análises de amostras "preciosas", como as arqueológicas.

No Brasil, um importante laboratório de datação por  $^{14}\text{C}$ , localizado no CENA/USP (Piracicaba – SP), foi implantado no início de 1990 e teve sucesso em estudos de intercomparações de resultados com laboratórios do exterior (Canadá e Estados Unidos), coordenadas pela IAEA, com a participação de mais de 68 grupos de pesquisa. Os equipamentos básicos para a datação das amostras constituem uma linha de síntese para a transformação da amostra sólida em benzeno e três espectrômetros de cintilação líquida de baixo nível de radiação de fundo para as contagens do  $^{14}\text{C}$  natural<sup>50</sup>.

A principal linha de pesquisa deste laboratório consiste na aplicação dos isótopos do carbono dos solos nos estudos de paleovegetações, desde a região sul do Brasil até a região amazônica.

Estão sendo desenvolvidos estudos da caracterização isotópica ( $\delta^{13}\text{C}$ ) e botânica das plantas e da composição isotópica ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) do  $\text{CO}_2$  do solo, visando informações sobre as dinâmicas de formações desses solos, assim como estudos das variações de  $\delta^{13}\text{C}$  e da atividade do  $^{14}\text{C}$  em anéis de crescimento de Araucária angustifolia (dendrocronologia), desde os últimos 200 anos até o presente.

Vale ressaltar que estudos de datação também podem ser realizados com outros elementos radioativos, como  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  e outros. Estes radioisótopos foram considerados por Guevara e Arribé<sup>51</sup>, que realizaram registros históricos, baseados em correlações entre as quantidades de  $^{137}\text{Cs}$  após alguns testes nucleares realizados nos anos 50 e 60 e, principalmente, antes e depois do acidente de Chernobyl, em 1986. O interessante é que os altos índices desses elementos, hipoteticamente provindos destes testes e do acidente de Chernobyl, estão sendo negligenciados em muitos estudos de datação. Estas informações nos fazem concluir que uma monitoração e reavaliação desses métodos sejam importantes para que sejam efetuadas correções nos resultados.

### Preservação de alimentos

A irradiação de alimentos geralmente é feita com irradiadores de cobalto-60. Esses equipamentos consistem em uma fonte de  $^{60}\text{Co}$  instalada em uma câmara, cujas paredes são blindadas com concreto. Os alimentos a serem irradiados (na forma *in natura* ou industrializada) são colocados em recipientes especiais e, através de um monotrilha, são conduzidos para o interior da câmara de irradiação, onde recebem uma dose de radiação gama programada, por um tempo pré-fixado. É uma técnica eficiente na conservação dos alimentos, pois reduz as perdas naturais causadas por processos fisiológicos (brotamento, maturação e envelhecimento), consequentemente aumentando o tempo de vida do alimento. O método também elimina ou reduz a proliferação de microorganismos, parasitas e pragas, sem causar prejuízo ao alimento. O processo de irradiação acarreta alterações químicas mínimas nos alimentos, nenhuma das quais nocivas ou perigosas, motivo pelo qual a Organização Mundial de Saúde (WHO, da sigla em inglês) recomenda sua aplicação e uso<sup>50</sup>.

Como a irradiação é um processo pós-colheita, ela não pode substituir os agrotóxicos utilizados no campo, mas pode substituir aditivos químicos usados para desinfecção de frutas após a colheita como, por ex., o brometo de metila, cujo uso está condenado<sup>50</sup>.

Um exemplo de irradiação em alimentos foi proposto por Grégoire e colaboradores<sup>52</sup>, para uso de raios-X de alta energia em carnes vermelhas. Neste trabalho, foi usada carne moída de boi, a qual foi irradiada com raios-X de 7,5 MeV ("Bremsstrahlung"), a uma dose de 15 kGy, duas vezes maior que a permitida pelo FDA para irradiação de carne, para assim avaliar o efeito da radiação. Ainda foram analisados quais os radioisótopos que estavam presentes na carne antes e após a irradiação e, depois, foi feita a comparação entre elas para se estabelecer qual a margem de segurança do alimento irradiado. Foi verificado que a carne não-irradiada contém naturalmente uma pequena quantidade de isótopos radioativos, entre eles o  $^{40}\text{K}$ , levando a uma dose baixa de exposição. A carne após ser irradiada com o "Bremsstrahlung" não teve sua radioatividade natural aumentada e, por isso, o risco para indivíduos que ingerem alimentos irradiados por raios-X, gerados por elétrons com energia nominal tão alta quanto 7,5 MeV, é desprezível.

Outro exemplo de utilização da irradiação está em trabalho realizado por Arthur e Aguilar<sup>53</sup> que, sabendo do sucesso do uso de moscas irradiadas e inférteis, utilizaram a radiação gama objetivando induzir a esterilização nos adultos da *Spodoptera frugiperda*, conhecida popularmente como lagarta-do-cartucho. Esta lagarta foi escolhida devido ao fato de ser uma das principais pragas da cultura de milho, contribu-

indo para a diminuição da produtividade das lavouras. Além disso, é um organismo que se alimenta de outras plantas, como sorgo, arroz e cevada, podendo causar prejuízos nestas culturas. Geralmente, o método mais utilizado contra pragas é o controle químico, cuja limitação é levar os insetos a adquirirem resistência. Por este motivo, os autores utilizaram a radiação gama em pupas da lagarta-do-cartucho, visando a esterilização das mesmas. Os autores irradiaram, com o uso de uma bomba de  $^{60}\text{Co}$ , pupas com cinco dias de idade (tanto de machos como de fêmeas) com doses de radiação gama de 50 a 200 Gy. Os adultos emergidos foram cruzados com adultos normais, em um total de cinco casais por tratamento. Observou-se que a dose necessária para levar à esterilização foi de 125 Gy para as fêmeas e de 200 Gy para os machos, mostrando a maior radioresistência dos machos. O trabalho mostra uma alternativa viável ao uso de produtos químicos, destacando mais uma vez a vantagem da radiação de alta energia.

### Indústria<sup>47,54</sup>

A aplicação de radioisótopos é muito importante industrialmente pelo fato de estar voltada a várias áreas diferentes, tais como desenvolvimento de processos e irradiação com aceleradores industriais de elétrons e irradiadores gama, radioesterilização, desinfestação e preservação de alimentos e produtos agrícolas, beneficiamento e análise de pedras preciosas irradiadas, tratamento de efluentes industriais e lixo hospitalar, desenvolvimento de irradiadores, equipamentos e dispositivos de irradiação, desenvolvimento de detectores e sensores de radiação, análise e caracterização de materiais poliméricos, cura, reticulação, enxertia, processamento e desenvolvimento de novos materiais poliméricos por meio de modificações induzidas pela radiação, desenvolvimento de embalagens para alimentos processados por radiação, desenvolvimento e produção de fontes radioativas para radioterapia, processo de radioesterilização para banco de tecidos biológicos, aplicação de radioisótopos na hidrologia e no controle de processos industriais, dosimetria industrial, produção de fontes radioativas seladas para gamagrafia industrial, entre outras atribuições<sup>54</sup>.

### CONCLUSÕES

Os marcos da história da radioatividade descritos nesse trabalho, sem dúvida alguma, colocam a radiação e a energia nuclear como uma ferramenta extremamente útil. Por outro lado, o mau uso dessa ferramenta na construção de bombas atômicas, que ameaçam a população mundial até hoje, é um exemplo da falta de maturidade e respeito ao ser humano e ao meio-ambiente por parte de certos órgãos. As consequências dos desastres foram muito graves, considerando-se as mortes e os danos físicos e psicológicos a toda uma população, entre outros problemas, como impactos ambientais que alteram o equilíbrio de toda uma ecologia. Assim, era de se imaginar que a radiação e a energia nuclear fossem banidas do nosso meio.

Felizmente, existem grupos que usufruem os benefícios que essa forma de energia oferece e, como pode ser observado, a energia nuclear continuou sendo utilizada após os acidentes e incidentes. O avanço em pesquisas que a envolvem em diversas áreas, como medicina, química, arqueologia, alimentícia, industrial, etc. também foi ampliado.

A energia nuclear em alguns países é a única fonte de energia elétrica viável. Atualmente, a energia nuclear atende 17% da demanda mundial de eletricidade<sup>28</sup>. Assim, é possível dizer que, embora existam fatores que vão contra o uso dessa forma de energia, existem aqueles favoráveis, os quais parecem estar ganhando mais força a cada dia. Este crescente desenvolvimento deve estar fundamentado nos interesses de grupos seletos que pensam na sua utilização de forma segura, em prol do bem dos seres vivos de uma maneira geral.



## REFERÊNCIAS

1. Choppin, G. R.; Liljenzin, J. -O.; Rydberg, J.; *Radiochemistry and Nuclear Chemistry*, Butterworth-Heinemann: Oxford, 1995.
2. Segrè, E.; *Dos Raios X aos Quarks - Físicos Modernos e Suas Descobertas*, Ed. UnB: Brasília, 1980, p. 20-21.
3. Becquerel, H.; *Compt. Rend. Acad. Sci. Paris* **1896**, 122, 420.
4. Snyder, C. H.; *The Extraordinary Chemistry of Ordinary Things*, 3<sup>rd</sup> ed., John Wiley & Sons: New York, 1997, p. 656.
5. Curie, M.; *Radioactive Substances*, Wisdom Library: New York, 1961.
6. Fonseca, M. R. M. da; *Completamente Química – Físico-Química*, Ed. FTD: São Paulo, 2001.
7. Lembo, A.; *Química, Realidade e Contexto*, Ed. Ática: São Paulo, 2000.
8. Romer, A.; *Radiochemistry and the Discovery of Isotopes*, Dover: New York, 1970, p. 191-195 e 207-218.
9. <http://nobelprize.org/physics/laureates/1903/marie-curie-bio.html>, acessada em Outubro 2004.
10. [http://www.ccr.jussieu.fr/radioactivite/english/old\\_as\\_world.htm](http://www.ccr.jussieu.fr/radioactivite/english/old_as_world.htm), acessada em Outubro 2004.
11. Hughes, D. J.; *The Neutron Story*, Anchor: Garden City, NY, 1959.
12. Glasstone, S.; *Sourcebook on Atomic Energy*, 3<sup>rd</sup> ed., van Nostrand Reinhold: New York, 1967.
13. Abelson, P. H.; *J. Chem. Educ.* **1989**, 66, 364.
14. Sime, R. L.; *J. Chem. Educ.* **1989**, 66, 373.
15. <http://www.energiatomica.hpg.ig.com.br>, acessada em Setembro 2004.
16. Rhodes, R.; *J. Chem. Educ.* **1989**, 66, 376.
17. <http://www.atomicarchive.com/History/mp/p1s1.shtml>, acessada em Outubro 2004.
18. [http://www.wagingpeace.org/articles/2003/08/01\\_krieger\\_remembering\\_portuguese.htm](http://www.wagingpeace.org/articles/2003/08/01_krieger_remembering_portuguese.htm), acessada em Outubro 2004.
19. <http://www.nuclearfiles.org/hiatomicbomb>, acessada em Outubro 2004.
20. Walker, J. M.; *Three Mile Island. A Nuclear Crisis in Historical Perspective*, University of California Press: Berkeley, 2004.
21. <http://www.chernobyl.co.uk/>, acessada em Janeiro 2005.
22. <http://www.un.org/ha/chernobyl/>, acessada em Fevereiro 2005.
23. <http://www.chernobyl.info/index.php?userhash=1198752&navID=16&IID=2>, acessada em Fevereiro 2005.
24. <http://www.world-nuclear.org/info/chernobyl/inf07.htm>, acessada em Fevereiro 2005.
25. Métivier, H.; *Chernobyl: Assessment of Radiological and Health Impacts*, OECD: Paris, 2002.
26. <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/radio.pdf>, acessada em Outubro 2004.
27. <http://www.inb.gov.br/enuclear.asp>, acessada em Outubro 2004.
28. <http://www.eletronuclear.gov.br/>, acessada em Agosto 2004.
29. <http://www.ambientebrasil.com.br>, acessada em Outubro 2004.
30. <http://isi3.isiknowledge.com>, acessada em Outubro 2004.
31. Mayssoedov, B. F.; *J. Nucl. Radiochem. Sci.* **2000**, 1, 23.
32. Vogg, H.; *Trends Anal. Chem.* **1983**, 2, 236.
33. Landolt, R. R.; Shanti, P. K.; *Radiochem. Radioanal. Lett.* **1969**, 1, 373.
34. <http://www.cnen.gov.br>, acessada em Agosto 2004.
35. Saha, G. B.; *Fundamentals of Nuclear Pharmacy*; 4<sup>th</sup> ed., Springer-Verlag: New York, 1997.
36. <http://corporativo.bibliomed.com.br>, acessada em Setembro 2004.
37. Kim, E.; Jeong, H.; Park, I.; Chong, S. C.; Bom, H.; Kim, C.; *Nucl. Med. Biol.* **2004**, 31, 781.
38. Courtyn, J.; Cornelissen, B.; Oltenfreiter, R.; Vandecapelle, M.; Slegers, G.; Strijckmans, K.; *Nucl. Med. Biol.* **2004**, 31, 649.
39. Breeman, W. A. P.; de Jong, M. T. M.; de Blois, E.; Bernard, B. F.; de Jong, M.; Krenning, E. P.; *Nucl. Med. Biol.* **2004**, 31, 821.
40. Kato, H.; Tsujii, H.; Miyamoto, T.; Mizoe, J.; Kamada, T.; Tsuji, H.; Yamada, S.; Kandatsu, S.; Yoshikawa, K.; Obata, T.; Ezawa, H.; Morita, S.; Tomizawa, M.; Morimoto, N.; Morimoto, N.; Fujita, J.; Ohto, M.; *J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* **2004**, 59, 1468.
41. Arikian, P.; Acar, O.; Acar, R.; Aycik, G. A.; Cetiner, M. A.; Demirel, H.; Efe, N.; Golge, T.; Gurellier, R.; Kirmaz, R.; Tulumen, S.; Yucel, H.; Zararsiz, A.; Agus, Y.; *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **2004**, 259, 391.
42. Veiga, L. H. S.; Melo, V.; Koifman, S.; Amaral, E. C. S.; *J. Radiol. Prot.* **2004**, 24, 295.
43. Maslov, O. D.; Molokanova, L. G.; Gustova, M. V.; Dmitriev, S. N.; *Radiochemistry* **2004**, 46, 403.
44. Vasconcellos, M. B. A.; Saiki, M.; Favaro, D. I. T.; Maihara, V. A.; Figueiredo, A. M. G.; Catharino, M. G. M.; *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **2004**, 259, 489.
45. Steiness, E.; *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **2004**, 261, 701.
46. <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/aplic.pdf>, acessada em Fevereiro 2005.
47. Groppi, F.; Birattari, C.; Bonardi, M.; Gini, L.; *Microchem. J.* **2002**, 73, 203.
48. Scott, E. M.; Bryant, C.; Carmi, I.; Cook, G.; Gulliksen, S.; Harkness, D.; Heinemeier, J.; McGee, E.; Naysmith, P.; Possnert, G.; van der Plicht, H.; van Strydonck, M.; *J. Archaeol. Sci.* **2004**, 31, 1209.
49. Mendonça, M. L. T. G.; Godoy, J. M.; *Quim. Nova* **2004**, 27, 323.
50. <http://www.cena.usp.br>, acessada em Setembro 2004.
51. Guevara, S. R.; Arribére, M.; *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **2002**, 252, 37.
52. Grégoire, O.; Cleland, M. R.; Mittendorfer, J.; Dababneh, S.; Ehlermann, D. A. E.; Fan, X.; Käppeler, F.; Logar, J.; Meissner, J.; Mullier, B.; Stichelbaut, F.; Thayer, D.W.; *Radiat. Phys. Chem.* **2003**, 67, 169.
53. Arthur, V.; Aguilar, J. A. D.; *Arq. Inst. Biol.* **2002**, 69, 75.
54. <http://www.ipen.br/ctr>, acessada em Julho 2005.