



REAL ACADÈMIA DE DOCTORS

Les radiacions ionitzants i la vida

•

Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari

Excm. Sr. Albert Biete i Solà

Doctor en Medicina

A l'acte de la seva recepció 21 de abril de 2010,

i

discurs de contestació de l'acadèmic de número

Excm. Sr. David Jou i Mirabent

Doctor en Ciències Físiques

Barcelona

2010

Excmo. Sr. Dr. D. Albert Biete i Solà

Les radiacions ionitzants i la vida

REIAL ACADEMIA DE DOCTORS
-Publicaciones-



Excel·lentíssim Senyor Degà-President,
Excel·lentíssims Senyors Acadèmics,
Excel·lentíssimes i Il·lustríssimes Autoritats,
Senyores i Senyors,

Les primeres paraules que vull pronunciar en aquest acte són d'agraïment i de respecte cap a aquesta docta i prestigiosa Acadèmia, de prestigi reconegut dins i fora del nostre país. Agraïment per l'honor que representa haver estat acceptat com a membre de la Reial Acadèmia de Doctors de Catalunya. Agraïment molt especial a l'Excm. Dr. Josep Casajuana, Degà-President i a l'Excm. Dr. Joaquim Gironella, cap de la Secció de Medicina. Agraïment també als acadèmics que m'han presentat i a tots els que integren aquesta prestigiosa i respectable corporació. Respecte també per la trajectòria de la Institució i els seus membres. La conjunció de diferents disciplines i coneixements reunits en una mateixa Acadèmia ens retorna al sentit original de "*Estudi General i Universitat*", de la universalitat del coneixement que mai l'especialització, que és necessària, ens ha de fer perdre. I afegeixo un mot més als d'agraïment i respecte: il·lusió. La il·lusió per treballar i ajudar, dins el marc de aquesta Acadèmia, a què la seva tasca sigui cada dia més rellevant i contribueixi, no només a la progressió del coneixement en les diverses disciplines, sinó també a la serena reflexió

sobre els usos del coneixement i la seva contribució al progrés de la societat.

Uns breus moments també per manifestar el meu agraïment en primer llocs als meus pares, afortunadament aquí presents. El seu esforç per donar-me l'oportunitat d'estudiar i el seu exemple de seriositat, amor i estímul, el porto present més que mai en aquests moments. Agraïment a tots els meus, a la família propera amb qui comparteixes la vida de cada dia i que avui m'acompanyen. Agraïment també als meus mestres, des de l'escola a la Universitat, els professors Subías, Martínez-Morillo, Peckham i Pedraza, entre d'altres. Recordo d'aquest últim la seva èmfasi, en el discurs de recepció a la Real Academia de Medicina a Madrid, en la "*liberación por el conocimiento*" única via real i pacífica de progrés i justícia en la societat. Agraïment també als companys de treball, tant de la Facultat com de l'Hospital Clínic. Sense ells i el seu ajut, consell i treball, no podria avui estar davant de vostès.

Des de que vaig començar la carrera de Medicina en la llavors acabada d'inaugurar Universitat Autònoma el 1968, sempre em va atraure l'ensenyament. He tingut la sort de poder fer el que m'interessava: tractar malalts de càncer i ensenyar als alumnes de medicina. I fer-ho amb companys prestigiosos i dels que he après. Gràcies un cop més.

El tema del meu discurs de recepció no és del camp més o menys especialitzat en el que fas la recerca o l'assistència. Es un tema que ens afecta i ens pot interessar en l'àmbit de diverses disciplines. Les radiacions afecten la vida de les persones i del estudiosos en molts aspectes: mèdics, biològics, farmacològics, tecnològics i d'enginyeria, físics, legals, econòmics, sociològics, etc. El seu ús, beneficis i riscos impregnen la nostra vida

quotidiana. Espero doncs poder despertar el seu interès i que les meves paraules siguin dignes d'aquesta docta audiència.

Procedeixo doncs a la lectura del meu discurs que versarà sobre "Les radiacions ionitzants i la vida"

INTRODUCCIÓ

Les radiacions formen part del medi natural, tant el terrenal, en el que es desenvolupa la vida humana, com el de l'espai exterior. De fet, les radiacions han tingut un paper fonamental en el desenvolupament de l'univers tal com avui el coneixem. No és difícil la seva definició. S'entén per radiació tota energia que es propaga a distància sense necessitat d'un conductor. A diferència d'altres formes de energia, com ara l'electricitat o el so, les radiacions es poden propagar a través del buit i, per tant, circular lliurement per l'espai. La vida en general, i la humana en particular, es poden desenvolupar gràcies al flux de radiacions, en especial lumíniques i infraroges, que ens arriben del sol.

Malgrat aquesta importància i probablement degut a què només una petita part (l'espectre lluminós) és detectada pels òrgans dels sentits humans (la retina), l'home no descobreix l'existència d'aquesta forma d'energia fins a les darreries del segle XIX. Però, com veurem més endavant, a partir de llavors, tant l'augment del coneixement com les aplicacions pràctiques, han crescut exponencialment. I no només en el vessant científic podem trobar-hi ressò, sinó en la majoria de facetes de la vida social. Així, les radiacions han influït i han sigut objecte de debat en els seus usos i riscos degut a las seves enormes potencialitats, tant benèfiques i de progrés com generadores de riscos i incerteses. Només cal aturar-se breument en els àmbits energètics, militars, socials i jurídics, per no parlar del usos mèdics, en els que centrarem bàsicament l'exposició.

Voldria, per tant, que aquestes paraules que tinc l'honor de dirigir des d'aquesta tribuna a aquesta distingida audiència, fossin senzillament un espai i un

temps de reflexió sobre la forma d'energia més recentment descoberta i que, per raons que anirem desgranant en el decurs de l'exposició, ha generat ensems el debat i la controvèrsia més gran que no pas tota la resta de formes d'energia conegudes. Per tant, crec que el tema és mereixedor de ser presentat i debatut, sobretot en els moments actuals en què el debat entorn d'aquesta forma d'energia torna a créixer amb força en el món, i en la nostra societat en particular. Aspectes puntuals com el debat al voltant de la represa del programa d'energia nuclear per diversos països, la instal·lació d'un magatzem de residus de mitjana activitat i la decisió sobre el seu emplaçament o bé les incerteses sobre el desenvolupament de programes de desenvolupament bèl·lic de l'energia atòmica sota la disfressa d'usos pacífics, són exemples prou clarificadors de la transcendència del tema. No cal dir, ja que està en la ment de tots, que quan un tema científic es contamina, tant per debats socials, opinions polítiques enceses i freqüentment dogmàtiques i demagògiques, com alhora, per pressions i interessos industrials i econòmics, pretendre que les opinions científiques són totes lliures i basades només en l'evidència del coneixement i l'experimentació, no deixa de ser una il·lusió més que una realitat.

ANTECEDENTS HISTÒRICS. EL LLARG CAMÍ DE LA DESCOBERTA

Ja he comentat que en aquest discurs de recepció voldria, més que fer una llarga exposició de dades, una reflexió personal al voltant de 35 anys de dedicació de la meva vida professional, tant assistencial com docent i de recerca, al món de les radiacions i els seus usos i potencialitats en l'àmbit de la medicina, i més concretament en el tractament del càncer. Un dels grans atractius d'aquesta docta Acadèmia és la multidisciplinarietat. Acostumats a l'exercici de la Medicina en els estrets marges de les especialitats (unes anatòmiques d'òrgans i sistemes, d'altres tecnològiques o nosològiques), tenir l'oportunitat de debatre temes de la ciència, les lletres o la cultura en aquest fòrum és una avinentesa d'enriquiment personal que es dona poques vegades. A les persones que hem dedicat tota la nostra vida, a part dels malalts, a la universitat, ens és grat de pensar al voltant de la universalitat del coneixement, i que ens han d'interessar i atraure totes les seves facetes per no acabar sent grans especialistes però, alhora, grans incultes. L'altra punt decisiu i enriquidor és el coneixement de la història de l'evolució científica i el món social i cultural en què s'ha anat desenvolupant. Marcel Proust ho descriu millor que jo amb les següents i encertades paraules: *"Sovint estem massa disposats a creure que el present es l'únic estat possible de les coses"*. Hem fet poca història de la ciència, o encara més, poca cultura de la ciència. Com diu bé Ramón y Cajal, *"al carro de la cultura española le falta la rueda de la ciencia"*.

Malgrat que la descoberta dels raigs X sovint és descrita com a fruit de la casualitat (fet que també s'ha dit amb Fleming i la penicil·lina), la realitat no ha estat exactament així. Totes les descobertes al voltant del també nou món de l'electricitat i el magnetisme, protagonitzades

per noms tan il·lustres i coneguts com Volta, Ampère, Faraday, etc. van ser precursors i facilitadores dels treballs i trobades de Röntgen i Becquerel. Així, Geissler i Hittorf perfeccionen els sistemes d'obtenció d'un buit eficaç que permet l'estudi del comportament de les descàrregues elèctriques en un tub de buit. El perfeccionament d'aquest per Crookes féu que se li donés el seu nom als tubs, encara que la fama li ve pels seus experiments decisius en l'estudi dels raigs catòdics (fluxos d'electrons que, emesos pel càtode o pol negatiu, es propaguen pel buit del tub cap a l'ànode a gran velocitat). Sembla ser que, sense ser-ne conscient, ja va aconseguir produir raigs X en descriure el velat d'algunes plaques radiogràfiques ocultes a la llum. Maxwell, amb la seva teoria electromagnètica de la naturalesa de la llum, també va facilitar força la comprensió de l'essència dels raigs X.

El 8 de novembre de 1895, Röntgen, (fig 1) professor de Física de la Universitat de Würzburg, a Alemanya, descobria un nou tipus de raigs, de naturalesa desconeguda i que anomenà Raigs X. Estudiant els raigs catòdics en el tub de Crookes i repetint experiències prèvies de Hittorf i Lenard, veié o, més ben dit, deduí, que del tub s'emetia una forma d'energia diferent i nova que produïa fluorescència al seu impacte sobre una superfície de platíclorur de bari. Alhora, encara observà un fenomen més sorprenent, com fou la capacitat de travessar cossos opacs a la llum i impressionar plaques fotogràfiques ocultes a la llum. Més impressionant si cap fou la imatge dels ossos de la mà del seu ajudant, Kölliker, quan la interposà entre el tub i la pantalla sensible. Per primer cop en la història de la humanitat es veien els ossos d'una persona viva sense que hi hagués cap fractura oberta! Poques setmanes després, el 28 de desembre, Röntgen enviava una comunicació sobre el descobriment a la Societat Fisicomèdica de Würzburg, i el 6 de gener del 1896

el diari Vienna Presse publicà el descobriment, fent-ne ressò ràpidament la majoria de diaris de l'època. Finalment, Röntgen en féu la primera presentació i demostració pública el 23 de gener a la Societat científica ja esmentada de Würzburg.



Fig 1. Retrat de W.K. Röntgen, descobridor dels raigs X el 1895

A Catalunya, en plena renaixença nacional, la descoberta dels raigs X és viscuda amb gran interès, tant des d'un punt de vista científic com del de la societat en general. Els nous raigs, en una època de gran desenvolupament de la fotografia, són vistos com una forma de la mateixa i es parla de la fotografia Röntgen. De fet, l'alumne de 6è curs de medicina, Cèsar Comas, era el fotògraf de la Facultat, i fou encarregat de fer la primera

demostració de l'obtenció d'una radiografia sota la direcció del degà, el professor Giné i Partagàs. Efectivament, després d'aconseguir un tub de Crookes del catedràtic de Física, Dr. Escriche i d'un rodet de Rumkorff de la Societat Angloespanyola d'Electricitat, es pogué realitzar una sessió demostrativa pública a l'amfiteatre de la Facultat de Medicina de Barcelona en presència de les principals personalitats científiques. S'obtingueren radiografies de diferents objectes, animals com una granota, i de l'avantbraç i la mà d'un nen. (Fig. 2)



Fig. 2. La Facultat de Medicina de la Universitat de Barcelona tingué un paper rellevant en la realització de la primera radiografia al nostre país. Imatge dels voltants de 1910 de la Facultat envoltada per l'Hospital Clínic i Provincial.

Entusiasmada amb el descobriment, Comas fou el gran pioner del progrés de la Radiologia i la Radioteràpia a Catalunya i a Espanya. Sensible a les propietats i possibilitats que oferien els raigs X, es desplaçaria aviat a Alemanya per obtenir la tecnologia més moderna per a la

seva aplicació. Amb la col·laboració del seu cosí, Agustí Prió, també metge, començà una tasca, gairebé altruista, de divulgació, treball i experimentació. La primera comunicació científica de Comas, publicada a Archivos de Ginecopatía, Obstetricia y Pediatría, data ja d'abril de 1896 i versa sobre la troballa de cossos estranys a l'interior del cos humà i lesions òssies. En data tan propera com 1908, ja aconseguí una plaça de electroradiòleg a l'Hospital Clínic, i posteriorment es feu càrrec de la direcció del Servei Central de Röntgenologia del mateix hospital. Tant ell com el Dr. Prió moriren a conseqüència de càncers radioinduits per la seva exposició excessiva als raigs X, dels quals es desconeixien els efectes adversos.

Quasi de forma simultània, es veié que els raigs X tenien efectes biològics sobre la pell, i s'explorà la seva possible utilitat en el guariment de diverses malalties. El 1896, Freund, a Viena, després d'observar que l'exposició als RX provocà una alopecía a un ajudant seu, va tractar un nevus pilós a un nen. Sembla ser que el primer càncer tractat amb RX fou un tumor maligne de la mama per Grubbe el mateix 1896. L'any 1899, a casa nostra, Comas i Prió ja publiquen resultats terapèutics en certes dermatosis i el 1900 un cas de lupus curat amb raigs X, seguint les experiències de Schönberg que descriví dos anys abans. En el camp de les neoplàsies, Stenbech i Sjögren presenten, en el Congrés Internacional d'Electrologia i Radiologia Mèdiques, dos casos de càncer de pell curats per l'efecte del raigs X. Comas i Prió, dos anys més tard, comuniquen a la Reial Acadèmia de Medicina "Un caso de epiteloma de la cara curado mediante los rayos Röntgen". Un cop es comença a descobrir i consolidar l'efecte antineoplàsic en els càncers de pell, i alhora, que es van desenvolupant aparells que emeten radiacions més penetrants, s'inicien els intents terapèutics en tumors més profunds i habitualment inoperables a l'època. Així, Comas i Prió presenten a

l'Institut Mèdic-Farmacèutic de Barcelona, l'any 1905, dos casos d'irradiació profunda postoperatòria de càncer de coll uterí.

En aquests primers anys es desenvolupen ràpidament les indicacions diagnòstiques i terapèutiques dels raigs X. En aquest darrer camp, els efectes beneficiosos sobre processos inflamatoris i infecciosos crònics (en una època sense antibiòtics ni antiinflamatoris) s'apliquen a millorar o guarir mastitis cròniques, escròfules tuberculoses, etc. També, en situacions més imaginatives, com les publicades en una revista italiana, es parla d'utilitat de la radioteràpia en el paludisme o les hemorroides! Però la indicació que s'imposa sens dubte i que persisteix avui en dia, és l'antineoplàsica, que es va certificant en nombroses localitzacions.

Ja ben aviat s'adverteixen efectes de l'exposició excessiva als raigs X. Pensem que, a primers de segle XX, l'obtenció d'una radiografia comportava varis minuts. Es veié que, en projeccions de crani, es produïa una depilació transitòria de l'hemicrani més proper al tub de raigs X. També els professionals exposats detectaren molt aviat l'aparició de lesions cutànies que sovint degeneraven en càncers de pell. Val la pena ressaltar que, ja a Catalunya, els esmentats Comas i Prió publiquen el 1906 un article divulgatiu a *La Vanguardia* titulat "La Röntgenterapia y la Röntgenpatología. Efectos terapéuticos y patológicos de los rayos X". Malauradament, la introducció de mesures protectores com els davantals plomats, els blindatges, etc., tardaren força a introduir-se en la pràctica diària i l'ús imprudent o amb desconeixement va provocar moltes morts. De fet, impressiona veure en el Cementiri de St. Georges, a Hamburg, el memorial erigit en honor i record de les víctimes dels RX. L'any 1936 ja hi havia gravats més de 150 noms, entre metges, infermeres i tècnics.

Amb motiu de la celebració del Centenari de la descoberta dels RX, es va inaugurar el 24 de febrer a Barcelona una zona enjardinada, situada enfront de l'antic Hospital Militar, dedicada al Dr. Cèsar Comas i Llaberia. Precisament el mateix dia, cent anys més tard que feia la demostració pública a l'antiga Facultat de Medicina, avui seu de la Reial Acadèmia de Medicina i Cirurgia. Val a dir que el Centenari de la descoberta de Röntgen passà bastant desapercebut al nostre país. Jo mateix, aleshores vicepresident de l'AERO (Asociación Española de Radioterapia y Oncología), vaig demanar a la Dirección General de Correos l'emissió d'un segell commemoratiu, i la resposta fou que no era una efemèride prou important!

No fou solament el descobriment de Röntgen el que introduí les radiacions en el camp mèdic, científic i, posteriorment, industrial. El físic francès Becquerel va descobrir el 1896 que l'urani, present àmpliament a la naturalesa, emetia energia en forma d'unes radiacions similars a les descrites per Röntgen. També va comprovar la capacitat de velar una placa radiogràfica no exposada a la llum. L'urani emetia tres tipus de radiació diferents, que anomenà alfa, beta i gamma. Aquesta descoberta, junt amb la de Röntgen, despertà l'interès de Thompson al laboratori Cavendish de Cambridge, que immediatament posà a Rutherford a treballar en el tema. De fet, Thompson obté les primeres radiografies a Anglaterra. També és fonamental assenyalar que Thompson va descobrir que els raigs catòdics que generen els raigs X en bombardejar l'ànode són fluxos d'electrons. Dos anys després, el matrimoni de físics Pierre i Maria Curie, (fig. 3) després de molts esforços i treballant en condicions precàries a París, descobriren i aïllen un nou element altament radioactiu que anomenen Radium. Tant Becquerel com Pierre Curie veieren sorpresos com la pell propera a les sals de radium que portaven en un flascó a la butxaca esdevenia

eritematosa i reproduïa la simptomatologia d'una cremada solar. A conseqüència d'aquestes observacions, el radium, dins d'ampolletes estanques a l'interior de tubs o agulles de platí, es va començar a aplicar tant en processos benignes com en el càncer. Degut a la llei del quadrat de la distància, es produïa un marcat decreixement de la dosi amb la distància, fet que es va voler aprofitar per a una major protecció dels teixits sans veïns. Bell, el 1903, ja descriu la primera inserció terapèutica de radium, i, en pocs anys, es van generalitzar les indicacions en càncers de mama, coll uterí, llengua, etc. Alhora, ja començà també la controvèrsia entre els defensors de la radioteràpia externa amb RX i els de la radiumteràpia, que s'allargà durant dècades. El paper de Marie Curie (Slodowska, el seu cognom polonès original) fou decisiu en l'avanç de la física de les radiacions, la radioactivitat natural dels isòtops inestables i les aplicacions terapèutiques en Medicina. Fou distingida amb dos premis Nobel, i la càtedra a la Sorbona i, a més a més, fou mare d'una també premi Nobel. La filla, Irene Curie, l'obtingué per la descoberta de la radioactivitat artificial el 1934.



Fig. 3 El matrimoni Pierre i Maria Curie, descobridors del Radium el 1898, en un segell commemoratiu de França, país d'adopció de Maria, d'origen polonès.

CONCEPTES I GENERALITATS SOBRE LES RADIACIONS

D'una manera senzilla, podem definir una radiació com una forma d'energia que es propaga a distància sense necessitat d'un conductor. Això ho diferencia d'altres formes que precisen un medi material conductor (el so, la calor o l'electricitat). La propagació en el buit és la que permet que ens arribi la radiació solar a la terra i, per tant, que la vida pugui existir. De fet, la pràctica totalitat de l'energia que arriba al planeta procedent de l'espai exterior, bàsicament del sol, ho fa en forma de radiació. Les radiacions, com veurem, són part integrant del medi espacial i del medi natural a la terra. L'atmosfera filtra i absorbeix les freqüències més energètiques i amb més acció biològica sobre la matèria viva. Es comporta, doncs, com un blindatge natural que protegeix els éssers vius, particularment els mamífers, que són els més sensibles, de les dosis excessives de radiacions ionitzants (RI), que els serien perjudicials.

Les fonts principals de procedència de les radiacions presents en el medi natural i de les que no ens podem sostraure, són les anomenades:

Radiació tel·lúrica. Procedeix de les emissions dels radioisòtops naturals (Urani, Radium, Thori, etc.) presents en les roques. Els materials granítics en són els principals productors, i les variacions segons les regions són molt considerables.

Radiació metabòlica. Procedeix dels isòtops radioactius naturals presents en el cos humà, ja que metabòlicament no es distingeixen en el seu comportament químic dels estables. K40 i C14 són els principals.

Radiació còsmica: Procedent de l'espai exterior, és filtrada en part per l'atmosfera. És més intensa en les

poblacions que viuen en alçada (3.000-4.000 metres) a l'altiplà andí o a l'Himàlaia i en les tripulacions aèries.

Encara que les dades són molt variables, la dosi mitja anual corporal s'estima en 1mSv. A la radiació de fons natural li hem d'afegir la produïda per l'activitat humana, que és:

Radiació industrial: Procedent de l'activitat de fabricació o reprocessament de materials radioactius (industrials o bèl·lics) i de centrals nuclears energètiques.

Radiació incorporada a l'atmosfera. Procedent d'aerosols amb radioisòtops no precipitables conseqüència d'escapaments d'explosions nuclears, contaminació industrial i accidents.

Radiació mèdica. La que prové d'usos mèdics i de laboratori de les RI, fonamentalment el Radiodiagnòstic i en molta menor proporció, la radioteràpia i la Medicina Nuclear. Les estimacions són d'1.5mSv/any per habitant, dels que 1.4 correspondrien a exploracions radiogràfiques.

Les radiacions es poden classificar, segons la seva naturalesa, en corpusculars i electromagnètiques (EM). Les primeres són partícules, habitualment subatòmiques (protons, electrons, neutrons, mesons, etc.), accelerades a grans velocitats. Les segones són fluxos d'energia formats per la propagació alternativa de camps elèctrics i magnètics que, atès que els efectes biològics són discontinus, els anomenem *fotons*. Aquests constitueixen els raigs X (produïts en les capes electròniques) o els raigs gamma (generats en el nucli). La propagació de les EM és molt ràpida, 300.000 km per segon. Un segon criteri classificador és segons els efectes en la matèria. Les més energètiques poden ionitzar àtoms i les anomenarem ionitzants (RI). La resta, no ionitzants. Dins l'espectre electromagnètic, la llum, els raigs infrarojos, les ones de

radar, TV, ràdio i telefonia mòbil, són no ionitzants. Els raigs ultraviolats (UV) són dèbilment ionitzants i, per tant, ja poden produir lesions malignes a la pell. Els raigs X i gamma són ionitzants.

S'han descrit pels radiofísics nombroses lleis que ens permeten conèixer el comportament de les radiacions. La llei del quadrat de la distància, la del cosí de Lambert o la de Bunsen i Roscoe, que no tenim espai per detallar, en són exemples. Des d'un punt de vista mèdic, podríem destacar la importància de la descrita per Grotus i Draper, que enuncia que només la radiació absorbida, pot fer efecte biològic. Arran de la formulació d'aquesta llei es van substituir les unitats de mesura d'exposició (Röntgens) per unitats d'absorció (rads i, avui en dia, Grays).

Un fenomen interessant és el mecanisme d'interacció de les RI amb la matèria. En el cas dels fotons, es pot realitzar una cessió d'energia als electrons atòmics de forma parcial (efecte Compton) o total (efecte fotoelèctric). Els electrons poden alliberar-se, interaccionant amb àtoms veïns o bé passant a òrbites més allunyades del nucli (excitacions). Quan l'electró excitat retorna al seu nivell energètic original, emet un raig X d'una energia determinada (radiació característica). És tan precisa de cada àtom i nivell, que l'anàlisi de les procedents dels estels ens ha permès de conèixer la seva composició química. Els fotons d'alta energia (superior a 1.022 MeV) poden interaccionar amb formació de parells o materialització de l'energia. El fotó en un punt proper a un nucli, desapareix, generant-se dues partícules noves: un electró i un positró, d'igual massa i càrrega elèctrica, però de diferent sentit. És una demostració pràctica de la certesa de la teoria d'Einstein de l'equivalència matèria-energia ($E=mc^2$). A l'inversa, petites quantitats de matèria poden alliberar grans quantitats d'energia. Les radiacions corpusculars

interaccionen de forma diferent. En el cas dels electrons, les més usades en medicina després dels fotons, la cessió d'energia principal es produeix per radiació de frenada o "bremsstrahlung". En entrar un electró accelerat al camp elèctric del nucli atòmic (sobretot si és de gran volum), la composició de forces entre l'atracció electrostàtica nuclear i la cinètica de l'electró, produeix una resultant de trajectòria diferent a la inicial. A part de la desviació, hi ha una frenada sobtada i intensa amb pèrdua d'energia en forma de calor i d'emissió d'un fotó. D'aquesta forma es produeix bona part dels RX en el tub que s'utilitza per obtenir radiografies.

Com ja hem dit, els raigs gamma també tenen naturalesa electromagnètica, però, a diferència dels raigs X, es generen en nuclis atòmics inestables que necessiten emetre energia per aconseguir l'estabilitat. En la majoria d'isòtops radioactius, bé siguin naturals o artificials, l'estabilitat s'assoleix d'una sèrie de desintegracions en cascada que alternen o comparteixen l'emissió de raigs gamma amb partícules com les alfa o beta. La radiació gamma generada per la desintegració del Co^{60} o el Cs^{137} ha sigut àmpliament utilitzada en radioteràpia al llarg dels anys. Els elements metastables sofreixen una transició isomèrica i emeten només raigs gamma. El Tc^{99m} , molt emprat en exploracions isotòpiques, n'és un bon exemple. En menor mesura, també es generen raigs gamma per fenòmens de captura radioactiva, captura electrònica i conversió interna.

Com deia Galileu, la ciència és l'art de la mesura. Descoberta aquesta nova forma d'energia, s'imposa tant tipificar-la com quantificar-la. Al principi, donada la insuficiència tecnològica, en Medicina s'emprà la "dosi eritema", o sigui la que produïa l'envermelliment de la pell. Donada la seva alta inexactitud, el 1928 es defineix el

Röntgen (R) com unitat d'exposició i, recordem la llei de Grotus i Draper, el 1953, en el marc del 7è Congrés Internacional de Radiologia, es va definir una nova unitat d'absorció: el rad (radiation absorbed dose). Diem que un teixit ha rebut una dosi de 1 rad quan ha absorbit una quantitat d'energia de 100 ergs per gram. Actualment la unitat oficial amb què mesurem les dosis de radiació és el Gray, en honor d'aquest famós radiobiòleg anglès. Un Gray equival a 100 rads.

FONAMENTS RADIOBIOLÒGICS

Com ja hem comentat anteriorment, ben aviat, després de la descoberta de les radiacions, tant els raigs X com la radioactivitat natural, es veié que tenien efectes quan la pell s'hi exposava. Això feu que els científics hi dedicaren la seva atenció, fins al punt que ja el 1903 dos investigadors francesos, Bergonié i Tribondeau, formularen la primera llei que relacionava la radiosensibilitat cel·lular i l'activitat i l'avenir mitòtic. En els anys successius, a mida que es van perfeccionar els sistemes de mesura de la quantitat i qualitat de la radiació, es va poder anar progressant en els estudis de la resposta cel·lular i tissular a l'exposició a radiacions. També es veié ben aviat que la radiosensibilitat era molt diferent segons els organismes. Oudin i Zimmern ja assenyalen el 1916 la major resistència de les bacteries i els protozous comparat amb les cèl·lules eucariotes, i ho interpreten com una major capacitat d'amortiment dels RX. De fet, anticipant-se a la llei de Grotus i Draper, també exposen textualment: "El principi de què l'acció d'una radiació només es produeix on es dissipa".

Aquests estudis van possibilitar el naixement d'una nova disciplina, la radiobiologia, que estudia l'efecte i la

resposta de les cèl·lules i teixits, tant normals com neoplàsics, a l'exposició a radiacions.

Una de les fites fonamentals assolida per aquesta nova branca de la ciència fou la identificació dels blancs o dianes més sensibles de la cèl·lula. I el més important de tots és la molècula de DNA (àcid desoxiribonucleic). La interacció de les radiacions ionitzants amb la matèria viva genera uns compostos químicament molt actius i de vida efímera. S'anomenen radicals lliures, i es caracteritzen per tenir un electró desapparellat en el nivell orbital més perifèric (spin, quart número quàntic). Són neutres i no s'han de confondre amb els ions, que sí que tenen càrrega elèctrica. Aquests radicals, sobretot els oxigenats, coneguts en anglès com ROS (Reactive Oxygen Species), tenen una alta capacitat oxidativa i, per tant, lesionen fàcilment les cadenes de DNA. Els danys poden ser diversos i de diferent gravetat (ruptures simples, dobles, pèrdua d'una base, etc.). El dany es pot fer mitjançant dues vies, l'efecte directe i l'indirecte. En el primer, l'efecte es produeix per impacte directe de la radiació (fotó, electró, protó, etc.) en el DNA i només representa un 15% dels efectes sobre el DNA. La majoria es produeixen per l'anomenat efecte indirecte, vehiculitzat per les molècules d'aigua. Atès que el citoplasma cel·lular està format en un 75-80% per H₂O, la màxima probabilitat del dipòsit d'energia per la radiació incident la té la molècula d'aigua, produint-se un fenomen anomenat hidròlisi de l'aigua i que podem formular així:

El fet té molta importància atès que, encara que els radicals lliures tinguin vida curta, posseeixen la capacitat de difondre's en un espai de 4 nm (nanometres), el doble del diàmetre de l'hèlix del DNA. Per tant, ens trobem davant del fenomen que la majoria del dany al DNA té lloc a través de les molècules d'aigua i la difusió dels radicals lliures. Aquest fet s'ha comprovat en veure que, a igualtat

de dosi, els efectes sobre el DNA són molt menors en situacions de deshidratació cel·lular. El nucli cel·lular té uns enzims que detecten el dany a les cadenes de DNA i uns altres que aïllen els segments malmesos i els reparen (DNA glicosilasa, DNA ligases i polimerases). Per això diem que les radiacions ionitzants causen danys letals i subletals. La ruptura simple d'una cadena és un exemple de dany subletal, fàcilment reparable en l'espai de temps d'uns vint minuts. Diferent és, per exemple, la ruptura doble que és difícilment reparable o bé és mal reparada (*misrepair*). Un fenomen interessant és que l'acumulació de dany subletal acaba esdevenint letal per exhauriment dels enzims reparadors. A escala visible al microscopi, els danys importants al DNA es converteixen en aberracions cromosòmiques diverses i de gravetat diferent: delecions, translocacions, dicèntriques, anells, etc., apareixen després d'una o varies exposicions.

La resposta cel·lular a la irradiació té diversos graus d'intensitat. La més severa, provocada per dosis molt altes i de gran intensitat, és la mort immediata. Aquesta sembla que, més que pel dany en el DNA, és vehiculitzada per alteracions greus en les mitocondries, que venen a ser com la central energètica cel·lular, o bé en les membranes dels lisosomes i de la mateixa cèl·lula, amb la seva ruptura. Aquesta destrucció cel·lular, semblant a la necrosi tèrmica o hipòxica, és molt tòxica per a l'organisme. Amb les dosis que utilitzem habitualment en terapèutica, la inactivació cel·lular es produeix més lentament, fins i tot després de varies divisions (mort diferida), i, en realitat les radiacions actuen com a inductores d'apoptosi quan la cèl·lula detecta que té un dany seriós i no reparable al DNA. Altres vegades es produeix simplement una esterilització amb impossibilitat d'entrar en mitosi (G0 permanent, estat de quiescència). Això ens explica biòpsies post-radioteràpia

(RDT) paradoxalment positives en restes tumorals ja sense activitat.

Les radiacions ionitzants (RI) són la forma d'energia amb més activitat biològica; són, per entendre'ns, les de més rendibilitat en termes de dosi/efecte. L'exemple que ens proposa Eric Hall, professor de la Universitat de Columbia, és ben entenedor: El total d'energia radiant administrada a tot el cos d'una persona per obtenir un efecte letal és una dosi de 4Gy, equivalent a 67 calories. Amb aquestes calories només podem escalfar una tassa de cafè de 37° (temperatura del cos humà) a 60°, o bé podem aixecar 40 cm. el pes d'una persona de 70 kg. A dosis equivalents, no totes les formes de radiacions (RI) tenen el mateix efecte biològic. N'hi ha que són densament ionitzants i n'hi ha que no. Per quantificar aquestes diferències s'ha definit un paràmetre, anomenat LET (*Linear Energy Transfer* o Transferència lineal d'energia) que relaciona la distància recorreguda en el medi absorbent i l'energia dipositada. L'efecte biològic és molt superior en RI d'alt LET com els raigs alfa (nuclis de He) o els neutrons, si ho comparem amb els raigs X o electrons accelerats.

Per tant, l'efecte sobre la matèria viva depèn, tant de la dosi administrada, com de la naturalesa de la RI i el seu LET, com del temps en què s'ha administrat (des de segons a anys) i el volum (tot el cos o part del mateix). Per estudiar científicament aquest efectes, l'any 1956 Puck i Marcus construeixen la primera corba de supervivència cel·lular. En l'eix de les abscisses col·loquen dosis creixents en escala numèrica i en el d'ordenades, la fracció de supervivència en escala logarítmica. Mitjançant l'exposició de cultius cel·lulars en plaques de Petri exposats a dosis creixents de RI i mesurant la capacitat de formació de colònies, així com l'eficiència del cultiu (*plating efficiency*) van descriure els

paràmetres definitoris de la corba de supervivència cel·lular. La corba té una part inicial en forma d'espatlla, i la seva amplada es defineix com D_q (Dosi quasi llindar o llinda). Després, la corba es fa recta amb pendent per tant uniforme i que es mesura com a D_0 (dosi que deixa una fracció de supervivència del 37%). Finalment, el número n o número d'extrapolació és també una mesura de l'amplada de l'espatlla inicial ja descrita. En obtenir corbes de cultius de tipus diferents de cèl·lules, veieren que eren diferents i, per tant, deduïren que tenien distinta sensibilitat. Això també succeïa amb les cèl·lules neoplàsiques. Les que tenien una àmplia espatlla i poc pendent eren poc radiosensibles i reparaven molt eficaçment el dany subletal. Oposadament, les molt radiosensibles tenien una estreta espatlla i pendent pronunciat. Aquestes troballes permeteren definir el concepte de radiosensibilitat intrínseca, característica de cada tipus cel·lular, tant normal com tumoral.

En els anys següents es descobrí que la radiosensibilitat cel·lular era més complexa que la intrínseca. El medi exterior i el moment cel·lular també influïen seriosament. Així, es veié que la intensitat de la RI o taxa de dosi (*rate*) augmentava l'efecte ensems que el cicle mitòtic de reproducció cel·lular. Fases com G_0 (repòs intermitòtic) o el final de la fase de síntesi de DNA (*late S phase*) eren molt més resistents que la mitosi (fase M). Encara que es va començar a sospitar cap als anys 30 del segle passat que l'oxigen tenia relació amb la radiosensibilitat, no fou fins a 1955 que Gray i Thomlinson observen l'increment de radioresistència en àrees hipòxiques de tumors malignes (fig. 4). Les cèl·lules amb una pressió parcial d' O_2 baixa es comporten com més radioresistents, probablement perquè l'exposició a RI genera menys radicals lliures oxigenats (ROS), que ja sabem que són els més tòxics. Aquesta troballa fou descrita

com efecte Oxigen, i per quantificar-lo es va descriure l'OER (*Oxygen Enhancement Ratio*) o efecte multiplicador de l'O₂. El seu valor oscil·la entre 2.5 i 3, o sigui que la fracció cel·lular hipòxica és entre 2 i 3 cops més radioresistent que les cèl·lules ben oxigenades. Aquest fet té una rellevància extraordinària atès que tots els tumors malignes tenen una fracció hipòxica (que oscil·la entre el 30 i el 70%), i, en canvi, les cèl·lules dels teixits sans són totes ben oxigenades. Tots aquests factors que condicionen i modulen la resposta cel·lular s'anomenen radiosensibilitat extrínseca.



Fig. 4. L.H. Gray (1905-1965), físic anglès pioner de la radiobiologia i dels estudis sobre la hipòxia tumoral. Llueix en aquesta imatge la medalla de President de la Röntgen Society, la societat científica radiològica més antiga

Aquests models a escala de cultius cel·lulars són evidentment simplificacions. Els teixits, i no cal dir ja els organismes en el seu conjunt, són molt més complexos i la

resposta a la irradiació està condicionada per multitud de factors. La interacció química per hormones i transmissors de senyal entre cèl·lules veïnes i entre teixits és un factor molt important. Un fenomen il·lustratiu n'és el descrit recentment *bystander effect*, de difícil traducció, començat a estudiar per Little i Nagasawa el 1992, i que ens explica que les cèl·lules irradiades poden transmetre senyals inductors d'apoptosi a les seves veïnes no irradiades. Això pot explicar que, en observacions clíniques, s'havia vist que el dany difonia a zones més enllà dels límits del camp de radioteràpia. La sensibilitat diferencial dels diferents òrgans i teixits és la resultant de la seva naturalesa i de les complexes relacions entre ells. Podem dividir, seguint a Paterson, els teixits i també els càncers en radiosensibles, de radiosensibilitat moderada i radioresistents.

LA RADIOPROTECCIÓ

A mesura que es va anar disseminant l'ús de les radiacions en els àmbits sanitari, industrial, energètic i militar, i coneixent els efectes biològics que podria produir, esdevingué la necessitat de prendre mesures protectores. El conjunt d'aquestes mesures destinades a evitar o disminuir els efectes indesitjables de les RI és el que anomenem radioprotecció. La necessitat de la seva implantació a tots els nivells d'ús es justifica per:

- a. El grup ampli de població exposada (personal professional i pacients)
- b. El grup de població potencialment exposada
- c. La seriositat del dany potencial en gravetat i irreversibilitat
- d. La manca de terapèutiques efectives un cop produïda l'exposició.

De tot l'exposat se'n pot deduir la necessitat d'establir un règim de limitació de dosi. S'han estudiat les anomalies cromosòmiques i la incidència de diversos tipus de càncer en les poblacions que viuen amb radiació de fons molt més intensa que la mitjana mundial, per raons d'altitud o de composició del terreny geològic. També hem de tenir present que la mobilitat geogràfica d'aquestes poblacions ha sigut molt reduïda al llarg de centenars d'anys. Els resultats han sigut de normalitat i, per tant, s'ha escollit pels organismes internacionals una Dosi Màxima Tolerable (MPD) anual a tot el cos, que és clarament inferior a la que reben aquests grups de població suara esmentats. La dosi anual mitjana de radiació natural de la població general s'estima en 1mSv (miliSievert), a la que li hem d'afegir 1.5 mSv de radiació per usos mèdics. La contribució del radioisòtops en suspensió permanent a l'atmosfera s'estima en 0.05 Sv/any. En total, entre natural i artificial, la dosi mitjana corporal total per habitant i any s'estima entre 2.5 i 3 mSv. La utilització del Sievert i no del Gray es deu a que l'efecte biològic no depèn només de la dosi sinó de la naturalesa de la radiació (i el seu LET). Així doncs una exposició a neutrons és entre 5 i 10 cops més perillosa que a raigs X, gamma o electrons. Per això, el Sievert es el resultat de la dosi en Gray multiplicada per un factor de qualitat o de correcció que depèn de la naturalesa de la radiació.

Per a la població en general s'ha determinat una MPD anual de 1mSv. Per a la població professionalment exposada la MPD era de 50Msv, i recentment es va reduir a 20 mSv. En realitat, aquestes dosis no s'assoleixen ni de bon tros, i el criteri que impera en radioprotecció és el que s'anomena ALARA, que són les sigles en anglès de "As low as reasonably achievable", tan baix com sigui raonablement possible. La introducció del criteri ALARA té una explicació: Hi ha danys que tenen una llinda de dosi

per sota de la qual no es produeixen (efectes no estocàstics) però n'hi ha d'altres que no en tenen de dosi-llinda, i, per tant, encara que és improbable, qualsevol dosi per petita que sigui els pot produir.

La protecció a l'exposició de la població té com a finalitat evitar la producció de càncers radioinduits, però també evitar o disminuir les mutacions genètiques provocades per les RI, principalment en el segment de la població més jove, en edat reproductiva. També es procura limitar al màxim el grup professionalment exposat, que ha de tenir més de 18 anys. Lògicament, totes les mesures de protecció són complexes i costoses, motiu pel qual s'ha de buscar un compromís entre seguretat i risc assumible, que mai podrà ser zero.

El correcte desenvolupament de les activitats humanes requereix la implantació d'un marc normatiu que permeti i garanteixi la salvaguarda dels drets individuals i col·lectius, així com l'adequada relació entre elles. L'ús de les RI en diversos camps socials, com són la sanitat, la indústria, l'energia i la defensa, han fet obligatori que els països elaborin un cos normatiu regulador. La no percepció de l'exposició, en no ser detectades les RI pels sentits humans, el període de latència perllongat d'anys i la irreversibilitat sovint del dany, són fets que expliquen la hipersensibilitat de la societat a les RI. Lògicament, aquesta percepció es tradueix posteriorment en una actitud més severa i vigilant del legislador en comparació amb altres agents potencialment perillosos de tipus químic o microbiològic. Atès que la immensa majoria de mutacions són perjudicials per a l'espècie, és lògic protegir a la població tant com hom podrà i, per tant, el tractament legal serà diferent per a la població general, els pacients candidats a radioteràpia (RDT), les persones en edat

reproductiva, els nens i el personal professionalment exposat.

La primera normativa legal amb rang de llei és la 25/64 de 29 d'abril sobre Energia Nuclear, que es promulga coincidint amb el desenvolupament dels usos industrials i de producció d'energia en centrals nuclears. A banda dels aspectes reguladors, es defineix per primera vegada la capacitat sancionadora sobre determinades conductes delictives específiques, fent èmfasi en la necessitat d'un tractament específic més enllà de l'àmbit del Codi Penal *"en atención a lo excepcional de las mismas"*. En el preàmbul s'especifica: *"constituye la presente ley el instrumento que recoge los principios actualmente vigentes sobre energía nuclear y protección contra el peligro de las RI"*. Lògic és que en l'article 1 es defineixi com a objecte de la llei el foment de les aplicacions pacífiques de l'energia nuclear a Espanya i la protecció de vides, salut i hisendes contra els perills derivats de la mateixa i també de l'exposició a RI. En el capítol VI es detallen mesures de seguretat, i l'article 44 especifica que *" los locales donde se instalen aparatos de rayos X deben reunir las condiciones mínimas de seguridad de acuerdo con lo dispuesto en el oportuno reglamento"*, que, per cert, no arriba fins bastant més tard. Això, a més del poc control de l'època, explica que seguissin funcionant fins fa ben pocs anys aparells de RX en condicions inadequades, per exemple en habitacions de pisos d'edificis d'habitatges sense cap blindatge de les parets. En els anys posteriors, apareixen nous textos legals amb reglaments que van desenvolupant aspectes concrets de la llei abans esmentada. Així el Reglament sobre Instal·lacions Nuclears i Radioactives, de 1999 i modificat el 2008, el RD 229/2006 de 29 de febrer sobre el control de fonts radioactives encapsulades d'alta activitat i fonts orfes, etc.

Bona part de la legislació espanyol està inspirada, sinó copiada directament, de la d'altres països, seguint les directrius de la CEE. En el marc específic de la medicina, destaquem la Directiva 1997/43 Euratom de 30 de juny relativa a la salut enfront dels riscos derivats de les RI en exposicions mèdiques. Directiva que s'aplicarà a Espanya mitjançant el Reglament sobre protecció sanitària contra les RI (RD 783/2001 de 6 de juliol) i el RD 1566/1998 de 17 de juliol, pel que s'estableixen els criteris de qualitat en radioteràpia. També exposen normatives de protecció, sobretot de cara a exploracions radiològiques diagnòstiques, el RD 1132/1990 de 14 de setembre, pel que s'estableixen mesures fonamentals de protecció radiològica a les persones sotmeses a exàmens i tractaments mèdics (que desenvolupa la Directiva 84/466 Euratom) i el RD 815/2001 de 13 de juliol. Aquest es dedica a la justificació de l'ús de les RI per a la protecció de les persones en a causa d'exposicions mèdiques. Per tant, hem anat passant, en el camp normatiu, de simples mesures de protecció inicials a criteris de limitació d'ús i, avui en dia, a criteris de justificació científica de l'ús de les RI. La base científica i els criteris de vigilància i seguiment de les normes estan en mans d'organismes dependents de l'ONU, com la IAEA (Agència Internacional de l'Energia Atòmica) radicada a Viena, o la ICRP (Comissió Internacional de Radioprotecció) i l'ICRU (Comitè Internacional d'Unitats Radiològiques). A l'Estat Espanyol, l'organisme regulador és el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), creat pe la llei 15/1980 de 22 d'abril, i que substituï l'antiga Junta d'Energia Nuclear, que funcionava des de 1951. El CSN és un organisme autònom (depèn directament del Parlament) i té com a funcions principals concedir les autoritzacions de construcció i posada en marxa de les instal·lacions radioactives, la vigilància del seu funcionament, el control de la monitorització i historial dosimètric dels treballadors professionalment exposats i la concessió de les llicències.

Aquestes són de dos tipus, d'operador i de supervisor. La darrera facultat per a dirigir el funcionament de la instal·lació radioactiva. A banda, una sèrie de competències també depenen dels ministeris d'Indústria i Sanitat.

A les instal·lacions radioactives es delimiten una sèrie d'àrees en funció del risc, i a les que només pot entrar el personal autoritzat. A l'àrea vigilada es pot rebre entre un 10 i un 30% de la MPD. A les que es pot rebre dosis més altes les anomenem àrees controlades. Són de tres categories: verda, groga i vermella. La verda és de permanència il·limitada tota la jornada laboral. La groga és, al contrari, de permanència limitada, i, finalment, la vermella és una àrea d'accés prohibit. La senyalització és vertical i horitzontal. La primera, situada a les portes d'entrada a la instal·lació, és el trisector (i no trèvol com posen alguns textos) de color segons l'àrea (gris a les vigilades, verd, groc o vermell a les controlades). El plafó indicatiu també té dues cartelles, una superior on s'indica el tipus d'àrea i una inferior on s'indica el tipus de risc, d'irradiació i/o contaminació. Per cert, termes que sovint es confonen i per tant és bo de detallar: Irradiació és l'exposició i subsegüent absorció de RI. Contaminació és l'acció i efecte d'incorporar un radioisòtop a una substància material, objecte o al cos humà. Aquest es pot contaminar per via cutània, digestiva o respiratòria. Tota contaminació implica, subsegüentment, irradiació i no així a l'inrevés. Fet important per als pacients sotmesos a radiografies o a radioteràpia: no es contaminen. El personal professional ha de estar monitoritzat amb dosímetres individuals, alhora que a la instal·lació n'hi ha de fixes ambientals.

Els criteris generals de les normes de radioprotecció es basen en tres punts: Blindatge, distància i temps. El

blindatge és la interposició d'un mitjà absorbent entre el focus productor de RI i l'individu. Un paràmetre que permet calcular els espessors de blindatge necessaris és la capa hemireductora (CHU) o HVL (half value layer). És l'espessor el que, per a una determinada radiació i medi absorbent, fa que el feix emergent tingui la meitat d'intensitat que el feix incident. En el cas dels fotons i electrons, la capacitat d'absorció és directament proporcional al número atòmic (Z), i, per això, s'utilitzen les làmines de plom (Pb). Atès que aquest metall és mal·leable, els espessors de blindatge no poden ultrapassar uns mil·límetres, ja que, apart de molt costós, no és pràctic. Llavors s'utilitzen blindatges de formigó normal o baritat, que té més densitat. El gruix és molt més gran que en el cas del plom, la qual cosa obliga a fer casamates o "búnquers" de formigó, en l'interior dels quals s'instal·len els generadors de RI o els reactors nuclears. En aquest darrer cas, en què el risc és d'irradiació i contaminació, l'edifici de contenció evitaria, en cas de fusió o explosió, la sortida dels radioisòtops a l'exterior. Els espessors habituals són d'un a dos metres.

La distància, en el cas de disposar d'espai suficient, és un factor de protecció barat i eficaç. La llei del quadrat de la distància ens explica el ràpid decreixement de la intensitat de la radiació en allunyar-nos-en. Finalment, el temps és el tercer factor general de protecció. Evidentment, l'exposició creix amb el temps i per tant l'entrenament del personal i la introducció d'automatismes disminueixen significativament el temps d'exposició.

Tots aquests principis generals de radioprotecció es concreten després en unes normes d'aplicació en els diferents àmbits laborals i en uns manuals d'operació i d'emergència que són supervisats periòdicament pels inspectors del CSN i, en el cas de Catalunya, del SCAR de

la Conselleria d'Indústria i Energia. En l'àmbit mèdic, les normatives s'apliquen a quatre tipus d'instal·lacions: laboratoris de recerca o clínics que manegen radioisòtops, radiodiagnòstic, radioteràpia i medicina nuclear. No és lloc adient en aquest discurs d'exposar les mesures concretes de cada instal·lació, tant estructurals com tecnològiques i d'operació, però sí és bo de fer èmfasi en la necessitat d'evitar a la població exposicions excessives per proliferació d'exposicions radiològiques innecessàries o que es podrien substituir per d'altres que no utilitzen RI (ecografia, ressonància magnètica, etc.). Aquesta consideració té especial rellevància en el cas de nens i persones en edat reproductiva. En l'actualitat, la quantitat de tomografies axials computoritzades (TAC) no plenament justificades, excessivament repetides en controls periòdics o clarament inadequades, és excessiu. Recordem el RD sobre justificació de les exposicions a RI. Òbviament, aquesta proliferació injustificada no es dona ni a radioteràpia (pacients amb càncer la majoria) o medicina nuclear (exploracions minoritàries i molt específiques). Un cas particular d'interès és la mamografia, exploració radiològica introduïda per Salomon en els anys seixanta del segle passat i que es fa repetidament en dones sanes per a prevenció secundària de càncer de mama en campanyes institucionals de cribratge. L'elevada incidència de la neoplàsia (1 dona de cada 11 a Catalunya), l'eficàcia del mètode en poder discriminador i les baixes dosis de radiació actuals en utilitzar pantalles de reforç o tècniques digitals, justifiquen plenament la seva utilització en els segments d'edat de més risc. Els hipotètics càncers de mama radioinduits són molts menys que els detectats en fases no palpables i, per tant, molt inicials i curables. Malgrat tot, és probable que dintre d'uns anys la mamografia es vagi reemplaçant per la RMN (ressonància magnètica), sobretot en dones de menys de 50 anys.

Finalment, diguem que en el cas de contaminació per radioisòtops, s'han d'aplicar una sèrie de mesures descontaminats de tipus físic i químic per dificultar-ne l'absorció, la incorporació i fixació a determinats òrgans i afavorir-ne la ràpida eliminació. En medicina nuclear s'utilitzen com a traçadors isòtops químicament innocus, en dosis molt baixes i amb un període de semidesintegració curt (cas del Tc99m, que és de 6 hores) i vida mitjana biològica curta. Res a veure amb el cas de la contaminació per sals de Radium (Ra226), que es fixen al teixit ossi (el Ra té un comportament químic similar al Ca, estan a la mateixa columna de la taula periòdica) de forma molt prolongada. La llarga vida metabòlica deguda a un baix recanvi unida a una vida física també llarga (el període és de més de 1600 anys) fa que la irradiació intensa i continuada dels ossos generi la inducció de tumors com els osteosarcomes. Aquesta raó, junt amb d'altres com la dificultat de manipulació segura o el risc en el cas de pèrdua d'una font, feu que es prohibís la seva utilització mèdica ja el 1978.

En la radioprotecció de la població hem de considerar dues situacions diferents: l'exposició intensa i única per un accident (reactor nuclear o instal·lació radioactiva) o efecte bèl·lic (en conflicte o en proves) i l'exposició crònica a dosis baixes i repetides al llarg de la vida laboral. En la primera situació hi ha risc de mort per alteracions hematològiques (aplàsia medul·lar), gastrointestinals i, en cas de dosi molt alta, per trastorns severes del SNC (sistema nerviós central). En els supervivents es poden veure càncers radioinduits, fonamentalment leucèmies, mama i tiroides). En el cas de la irradiació crònica, el problema principal es el càncer radioinduit, (de pell, per exemple, en el cas dels primers radiòlegs). Afortunadament, amb les mesures de protecció actuals en els centres sanitaris, les

dosis són tan baixes, i en molts casos zero, que ja no es veuen efectes tardans d'irradiació crònica

En la sobreexposició intensa, habitualment única, els efectes depenen tant de la dosi rebuda com de la naturalesa de la radiació, que no sempre es pot conèixer amb precisió. Com ja hem dit anteriorment, els neutrons accelerats i les partícules alfa són els més danyosos. El quadre clínic que es desenvolupa es coneix com a Síndrome d'Irradiació Aguda (SIA) i es caracteritza per una sèrie de símptomes i signes hematològics, digestius, cutanis i nerviosos.¹ L'efecte mielosupressor de les RI es deu a la gran radiosensibilitat de les cèl·lules progenitores hemàtiques del moll d'os i d'algunes de sang perifèrica, com els limfòcits. Entre dues i tres setmanes després de l'exposició, les anàlisis detecten una leucopènia marcada amb limfopènia absoluta i trobocitopènia. L'anèmia apareix més tardanament, degut a la vida mitjana mes llarga del hematies, que és de 120 dies. Aquest quadre comporta situacions greus, com infeccions (per la baixada immunològica) i hemorràgies (per la baixada de plaquetes). El procés d'afectació del tub digestiu, amb denudació de la mucosa, especialment en el budell prim, cursa amb vòmits, nàusees i diarrea greu, que condueixen a sèpsies d'origen gastrointestinal, deshidratació i trastorns hidroelectrolítics greus. Finalment, en casos d'exposició a dosis molt altes, apareixen signes d'irritació del sistema nerviós central (SNC) en forma de pèrdua de consciència (coma), convulsions, etc., possiblement produïdes per l'edema cerebral i alteracions de la barrera hematoencefàlica. El SIA és un quadre complex i greu, amb evolució sovint mortal malgrat les mesures terapèutiques més avançades, que, resumidament

¹ Biete A. *Efectos de la sobredosis por irradiación*. Med Clin (Barc) (1992) 92: 55-57

consisteixen, apart de la descontaminació inicial, en aïllament, antibiòtics, transfusions i aportació de plaquetes, factors estimuladors de moll d'os de sèrie blanca i roja i, en alguns casos, transplantament de moll d'os. Les dades de SIA provenen de l'estudi dels casos registrats en les explosions bèl·liques al Japó, accidents en assaigs nuclears no subterranis (illes Fiji, Sàhara) amb exposició directa i/o pluja radioactiva, accidents en indústries i laboratoris de física nuclear (uns 50 casos) i l'accident més massiu, el de la central de Txernobyl, amb més d'un centenar de grans irradiats.

EL DESENVOLUPAMENT TECNOLÒGIC

LA RADIOTERÀPIA EXTERNA COM EXEMPLE

El primitiu tub de Crookes, on Röntgen va fer els seus primers experiments amb raigs catòdics i posteriorment amb els nous RX, va sofrir ràpidament modificacions per millorar el seu rendiment i precisió. L'anticàtode, on es formaven els RX, va passar de ser d'alumini a platí, la qual cosa augmentava la quantitat de radiació produïda. Es van fer modificacions en la forma dels tubs, millores en la refrigeració per dissipar la calor generada en l'anticàtode, perfeccionament del buit a l'interior del tub, etc. Villard, Rosenthal i Chabaud foren autors d'un bon nombre de perfeccionaments. El filament incandescent productor d'electrons (efecte termoiónic) descrit per Edison el 1879 (i que dona lloc a la bombeta elèctrica) és perfeccionat per Coolidge el 1913 per tal de tenir una llarga durada. Aquest nou filament de tungstè (Mb) i els generadors permeten obtenir tensions al tub de 140kV.

La penetració dels RX és directament proporcional a la seva energia. En aquests primers anys, l'escassa penetrabilitat fou suficient per obtenir radiografies (això sí, amb temps d'exposició que no tenen res a veure amb els actuals) però no per a tractar tumors que no fossin superficials. No és fins el 1927 que Allibone construeix un tub que arriba a un pic tensional de 400kV, i poc temps després unint diverses seccions en cadena o cascada, Coolidge aconseguí 900kV i Sorenson, a Califòrnia, assolí 1MV. De fet, entre 1928 i 1932, a diversos hospitals, entre ells el conegut Memorial Sloan Kettering Cancer Center de Nova York, instal·len i fan els primers tractaments amb aquests tubs que ja se'n diuen de supervoltatge per diferenciar-los dels més baixos (ortovoltatge). Un factor limitador fonamental era l'absència d'una Dosi-eritema precisa, ja que la dosieritema no ho era en absolut. No és fins el 1928 que, gràcies a Bragg (conegut també pel pic de Bragg d'absorció dels protons), es defineix la unitat d'exposició: el Röntgen (R) en honor al descobridor. Es defineix actualment com (ICRU, 1956) l'exposició de RX o gamma que genera una radiació corpuscular secundària associada que produeix ions per valor d'una esu (unitat electrostàtica de càrrega) en 0.001293 gr. d'aire (1cm³). Equival a 2.58x10⁻⁴ coulombs/kg aire. Es vàlida la seva utilització per energies de fins a 3MV.

En veure que amb el sistema clàssic de tensió de tub entre elèctrodes ja no es podien aconseguir RX de més energia, al Massachusetts Institute of Technology es va construir un generador electrostàtic Van der Graaff que, el 1936, va aconseguir produir RX de 2 a 6MV. En aquests anys, dos investigadors, Sloan i Lawrence (aquest darrer més conegut per haver dissenyat el primer ciclotró per accelerar neutrons) construeixen el primer canó d'acceleració d'electrons mitjançant una guia d'ones d'alta

freqüència. És cap als anys 40, i no cal dir que els interessos bèl·lics hi ajudaren amb un generós finançament, que la col·laboració de físics atòmics, enginyers, radiobiòlegs i radioterapeutes aconseguí el disseny de diferents acceleradors de partícules: Betatró, sincrotró, accelerador lineal, ciclotró, etc. De fet, el sincrotró es dissenya quasi simultàniament pel rus Veksler a la URSS i l'americà McMillan a Los Alamos (USA). Cap a 1950 els acceleradors Van de Graaf es van començar a utilitzar en terapèutica, encara que la complexitat tècnica i les freqüents avaries feren que és penses en altres alternatives més senzilles. Irene Joliot-Curie, filla de Pierre i Maria Curie i també Premi Nobel, descobrí el 1934 la radioactivitat artificial. La producció d'isòtops al laboratori, en piles atòmiques o en reactors nuclears, va permetre d'elaborar-ne dos amb molt interès per a RDT externa: el Cs137 i el Co60. Aquest darrer, que es desintegra emetent radiació beta i fotons de 1.17 i 1.33MeV en proporcions iguals, té un període de semidesintegració de 5.6 anys i, per tant, utilitat en RDT clínica. A principis del anys 50 es dissenyaren les primeres "bombes" de Cobalt, que contenien una pastilla de petites dimensions (2-3cm.) amb una alta activitat de Co60 (1.000 Curies al principi, que ràpidament foren 3.000) obtingut en un reactor nuclear en bombardejar amb neutrons el cobalt estable. El 1951 es van fabricar les dues primeres unitats al reactor de Chalk River, al Canadà. Al cap de poc temps es van instal·lar als hospitals de Saskatoon i a London, al Canadà. Mesos després s'instal·la a l'hospital de Santa Chiara (Trento, Itàlia) la primera unitat de Co60. A Espanya, la primera s'instal·la el 1957 a la Clínica Ruber de Madrid. A Catalunya s'instal·la la primera, gràcies als esforços del Pr. Guílera i el seu col·laborador i mestre meu, el Dr. Subías, al pavelló d'Oncologia de l'Hospital de la Sta. Creu i Sant Pau. És l'any 1958, i jo encara vaig tenir l'oportunitat, quasi 20 anys més tard, de tractar pacients amb aquell aparell, que per cert era japonès, Toshiba.

Empresa que va buscar altres línies més productives, ja que mai més en va fabricar. Aquest aparell fou donat per l'AECC (Associació Espanyola Contra el Càncer) de Barcelona(Fig. 5). Per contra els canadencs hi van trobar una font de riquesa, i els models Theratron® s'han fabricat fins l'actualitat per AECL (Atomic Energy of Canada Ltd). Fins i tot el govern canadenc, a diferència de l'espanyol, en el centenari de la descoberta de Röntgen va dedicar un segell a aquestes bombes de cobalt (Fig. 6)

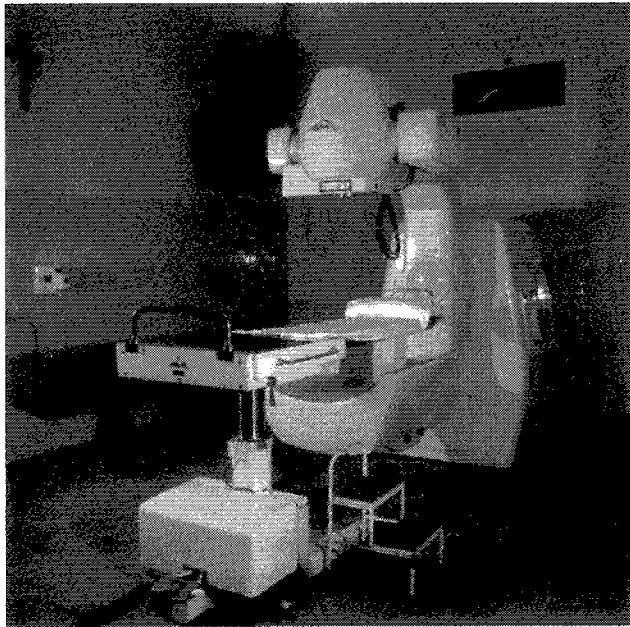


Fig. 5. Imatge de la primera bomba de cobalt instal·lada el 1958 a Catalunya al pavelló del càncer a l'Hospital de la Sta. Creu i St. Pau, gràcies als esforços del Dr. Subias i el suport econòmic de l'AECC de Barcelona.

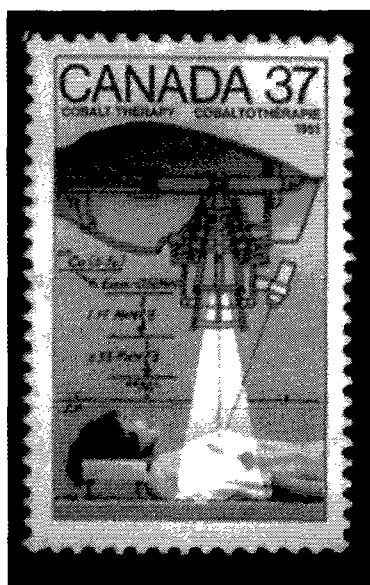


Fig. 6. Segell de Canadà emès el 1951 arran de la posada en marxa de la cobaltoteràpia, que fou un important avenç a l'època. En el segell també s'hi detalla la desintegració radioactiva del Co60.

Les unitats de cobalt, malgrat les seves limitacions tècniques de limitada penetració del feix, penombra, temps d'irradiació, etc., van representar un avenç en el seu temps i permeteren d'estendre la RDT de forma suficient a les necessitats amb un cost assumible. Encara ara són una bona alternativa en països subdesenvolupats on els serveis tècnics són limitats, així com també la qualificació professional dels equips. Encara a Espanya i a Catalunya, on la substitució per acceleradors ha sigut força lenta, hi ha un 12% de les unitats que són de cobaltoteràpia. Els desenvolupaments tècnics dels nous acceleradors van permetre que a USA, ja el 1956, un oncòleg radioteràpic ben conegut en el tractament dels limfomes de Hodgkin, Henry Kaplan, tractés amb RX de 6MV pacients a

Stanford, gràcies als dissenys dels germans Varian. A principi dels 60 ja s'aconsegueixen acceleradors lineals (AL) amb capçal capaç de fer una rotació isocèntrica de 360°. La complexitat tècnica, el cost de manteniment i les avaries freqüents van dificultar que s'imposessin ràpidament per sobre de les bombes de cobalt.

Avui en dia, els AL constitueixen les unitats de RDT més esteses. Alta precisió, fiabilitat, penetració òptima del feix de radiació amb energies de 4 fins a 25MV, protecció de la pell, escassa penombra i temps quasi instantanis d'irradiació, són característiques que fan que hagin triomfat definitivament al mercat. Alhora no hi ha risc d'irradiació i no generen residus radioactius com les fonts de Co60 o Cs137 ja degradades. En els AL de darrera generació, la incorporació de sistemes d'imatge integrats, com el TAC, permeten ajustar l'isocentre diàriament, corregint els possibles desplaçaments interfracció amb la tècnica anomenada IGRT (Image Guided Radiation Therapy)(Fig. 7) En els casos de tumors amb mobilitat intrafracció, o sigui durant la sessió degut al moviment ventilatori, s'han dissenyat sistemes de sincronització respiratòria. També els progressos en planificació dosimètrica i en irradiació en moviment han permès desenvolupar una tècnica coneguda com IMRT (Intensity Modulated Radiation Therapy). La combinació de taxa de dosi variable, diafragma multifulles variable i velocitat de rotació també variable, permet obtenir distribucions de la dosi perfectament adaptades a la morfologia tumoral, amb especial protecció dels teixits i òrgans sans peritumorals. Aquest fet és especialment útil en casos amb formes còncaves o tumors que abracen òrgans a protegir (recte, medul-la espinal, etc). L'evolució tecnològica ha sigut espectacular en aquests darrers anys. Un dels exemples més representatius, que està fent canviar molts dels esquemes clàssics de la RDT, és el Cyberknife®, un AL de

6MV instal·lat sobre un braç robòtic i connectat a uns tubs de RX que li permeten interaccionar amb el pacient (Fig. 8). La utilització d'un gran nombre de feixos quasi puntuals de RX i la verificació periòdica de la posició tumoral, permeten l'administració de dosis molt altes de radiació, o més baixes, però hipofraccionades, en 4-5 sessions. Aquest esquema assegura la precisió, evita la irradiació de teixits sans veïns i permet dosis més efectives. Aquest sistema és ja competitiu a les indicacions quirúrgiques en tumors hepàtics, pulmonars, cerebrals, etc. Sobretot en pacients en què l'edat, l'estat general o les malalties associades fan que la cirurgia es consideri d'alt risc. Una altra tècnica amb característiques competitives al robot és la tomoteràpia, que combina en el mateix aparell un TAC i un AL de 6MV. Aquesta associació fa possible, no només una alta precisió, si no també una correcció de possibles desplaçaments inter i intrafracció.

ELS ACCIDENTS I USOS DESTRUCTIUS

Durant la segona guerra mundial, les grans potències, fonamentalment nord-americans, russos i alemanys, feren grans esforços per aprofitar per usos militars la gran quantitat d'energia alliberada en la fissió nuclear de l'urani. De fet, era sabut que qui fos el primer en fabricar una bomba nuclear podria decidir el signe de la victòria i de fet es feren esforços intensos des d'un punt de vista científic, tecnològic i pressupostari. Al final, els americans guanyaren la cursa, seguits molt de prop per la URSS, però els primers foren els únics que feren explotar dos enginys nuclears al Japó a les ciutats de Hiroshima i Nagasaki, decidint en pocs dies el final de la guerra en el front oriental. Malgrat ser bombes de poca potència (12.5 i 22 kT) comparades amb les actuals i d'haver ja bombardejat

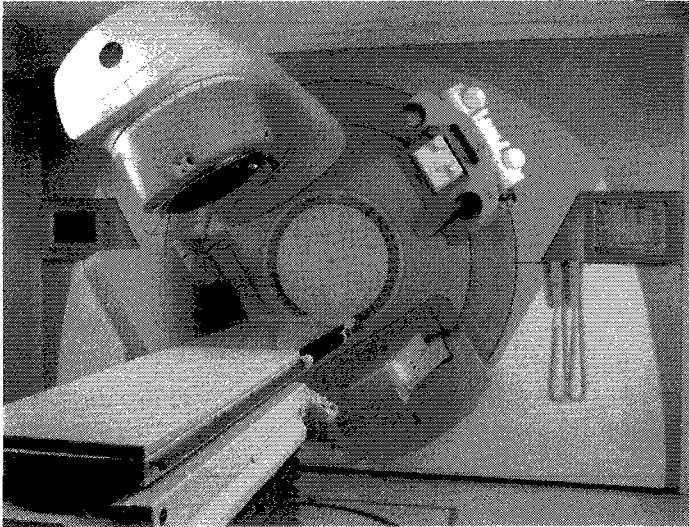


Fig. 7. Accelerador lineal de 18MV equipat amb sistemes d'imatge guiada (IGRT). Cortesia de Elekta.

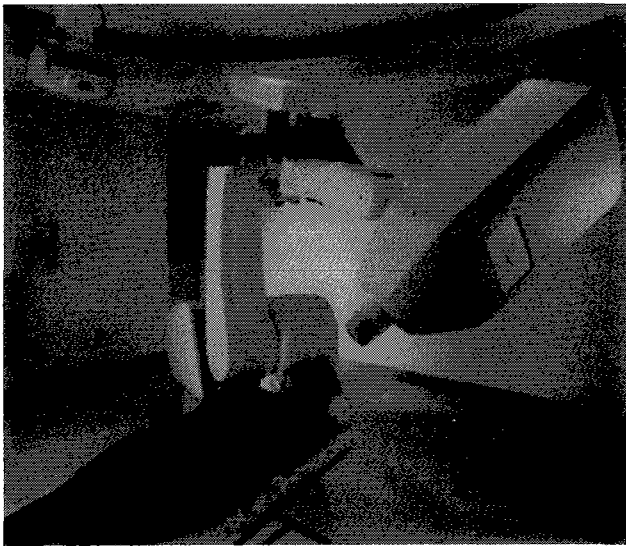


Fig. 8. Accelerador lineal de 6MV instal·lat en un braç robòtic i dissenyat per a irradiació estereotàctica. (cortesia d'Accuray)

intensivament ciutats europees amb explosius convencionals, els efectes alarmístics foren extraordinaris i, al cap i a la fi, aconseguiren la rendició poc després del Japó. La major part de les víctimes (més del 80%), ho foren per efectes de l'ona expansiva de l'explosió (*blast*) i de l'altíssima temperatura dels gasos de la combustió, per tant efectes similars a un explosiu convencional. L'exposició a la radiació, tan directa com secundària a la contaminació atmosfèrica per radioisòtops, fou responsable d'un nombre proporcionalment petit de morts i ferits. Però, en les poblacions del moment i en les generacions posteriors van quedar profundament gravades en el subconscient la potència i perillositat de les armes nuclears i es va associar fortament amb les radiacions atòmiques.

Un cop restablerta la pau, una nova amenaça per a ella comença amb el que s'anomena la guerra freda. La tensió creixent entre les dues superpotències guanyadores, USA i la URSS, aboca a una carrera armamentística imparable que fa que els arsenals nuclears acumulin quantitats inimaginables d'enginyers nuclears, capaços d'assegurar una destrucció massiva de tot el món. A menor escala, també es proveeixen d'aquest armament altres països com França, Gran Bretanya, Xina, Índia, Pakistan, etc. Els riscos són dobles i creixents: d'una banda, un món nuclearitzat i una situació de gran tensió entre el bloc comunista i l'occidental. Tots tenim present que, el 1962, la crisi per la instal·lació de missils nuclears soviètics a Cuba va estar a punt de degenerar en una catàstrofe. I n'és només un exemple. D'altra banda, les potències van començar a fer assaigs nuclears fent explotar bombes a l'atmosfera. Recentment, s'han denunciat a la llum pública les proves nuclears franceses al Sàhara en el principi de la dècada dels anys seixanta, en plena guerra d'Argèlia. Soldats de lleva francesos foren exposats, no per accident, sinó intencionadament, a altes dosis de radiació procedents de

l'explosió, per estudiar els efectes sobre el cos humà en cas de conflicte. Potser no intencionadament, però fruit dels canvis en la direcció dels vents i de les pluges que precipiten les partícules radioactives en suspensió a l'atmosfera, nadius d'illes del Pacífic (les Fidji són les més conegudes) també patiren greus cremades per efecte de les radiacions de les proves nuclears. La indignació internacional aconseguí la prohibició de les proves a l'atmosfera i passen a fer-se soterrànies, fins que en l'actualitat són, que sapiguem, quasi inexistent.

Probablement s'han registrat casos d'exposició accidental a radiacions en instal·lacions militars, però no han transcendit. En usos industrials hi ha hagut irradiacions puntuals però la gravetat dels danys a les persones ha estat molt inferior als accidents laborals provocats per altres causes habituals com ara traumatismes per caiguda, exposició a tòxics, etc. De fet és molt difícil conèixer detalls, tant d'accidents com de contaminació radioactiva per abandonament de material bèl·lic nuclear, a l'antiga URSS degut a l'obscurantisme de les dictadures. Potser el més greu denunciat ha estat el 1957 a la planta d'emmagatzematge de Kishtim. L'explosió d'un contenidor de 160 metres cúbics de residus va contaminar una superfície de 1000 km² encara que ignorem els danys en les persones i si es van registrar víctimes mortals. Segons el biòleg rus Medvedev, es va produir el 1958 una suposada catàstrofe a Txeliablinsk, als Urals del Sud, d'origen militar i amb centenars de morts. La CIA americana, pel que sembla coneixedora del fet, tampoc en va alertar per evitar alarma de la població i poder continuar amb els experiments nuclears militars. També en el transport de materials radioactius s'han registrat accidents, tant aeris com navals i en terra. Tots recordem la pèrdua de bombes nuclears a la platja Palomares per part d'un avió americà i el bany tranquil·litzador del ministre

Fraga Iribarne i l'ambaixador dels Estats Units. La transparència informativa del moment també va deixar molt que desitjar, sobretot perquè els pilots rescatats de l'accident van manifestar que no entenien com alguna de les bombes de 1.5 megatons no va explotar en fer-ho l'explosiu iniciador. La contaminació amb Plutoni va ser important.

Referent a les centrals nuclears productores d'electricitat, que és el tema pel que la població a tot el món, si més no a l'occidental, està més sensibilitzada, els incidents han sigut nombrosos, la majoria no relacionats directament amb el reactor o amb risc de fuga radioactiva. Com a més significatius podem esmentar el de Windscale el 1957, ben descrit a la literatura científica i degut a una fallida en els sistemes de detecció de temperatura. A la població exposada, relativament reduïda, només s'ha pogut detectar un augment lleu en la incidència de càncer de tiroïdes. El segon accident va passar als Estats Units (central de Three Mile Island) el 1979². La causa principal fou atribuïda a una fallida del sistema de bombeig de l'aigua pressuritzada al nucli del reactor amb el reescalfament subsegüent, agreujat per problemes en els sensors tèrmics. Es va produir un escapament de productes de fissió de l'urani a través de l'aigua del circuit de refrigeració. Fins ara no s'han detectat efectes patològics objectivables i mesurables en la població exposada dels voltants, i no es van produir entre els treballadors cap SIA (Síndrome d'Irradiació Aguda). Fins a l'accident de Txernobyl, que tot seguit descriurem, al registre de Oak Ridge (USA) es quantificaven un total de 284 accidents, la majoria industrials, amb 1.358 persones exposades, i de les que n'havien mort 33. La majoria de casos foren

² *Kouts H Safety of Nuclear Plants in the United States. Radiation Research* (1988) 113; 211-216

exhaustivament estudiats i publicats. Xifres, totes elles, que revelen que les activitats amb radiació eren infinitament més segures que la resta d'activitats industrials o laborals.³

El darrer, i alhora tremendament més greu accident fou el que succeí a la central soviètica (avui ucraïniana) de Txernobyl. El reactor instal·lat, de tipus BMRK-1000, tenia un disseny molt deficitari comparat amb els de les centrals occidentals de l'època, la majoria de tipus PWR (*pressure water reactor*). De fet ja en aquells moments no complia amb les especificacions de seguretat dels reactors occidentals. La seva inestabilitat a baix règim de funcionament comporta una excessiva responsabilitat als operadors. L'absència d'edifici de contenció que allotgés el reactor (el búnquer amb cúpula que estem acostumats a veure en les centrals del nostre entorn) explica la greu contaminació atmosfèrica produïda, encara que s'han expressat dubtes de si una central occidental hagués pogut resistir bé la importància de l'explosió. En la gènesi de l'accident es produïren nombrosos errors humans en cadena, tant en les ordres rebudes de Moscou com en les actuacions del personal tècnic de la central. Per contra, la resposta davant la catàstrofe ha sigut majoritàriament qualificada de bona en la literatura especialitzada. Degut al sobreescalfament del nucli, amb alliberament d'hidrogen, es produí una explosió que destruï la tapa del reactor. Aquest fet lliurà a l'atmosfera una gran quantitat de radioisòtops durant uns deu dies, encara que es detectaren fugues fins ben bé passats cinc mesos. L'evidència de l'accident no fou comunicada per les autoritats soviètiques, sinó per la detecció el dia següent de partícules radioactives a la roba dels treballadors de la central nuclear sueca de Fordsmark,

³ *Occupational Radiation Epidemiology Base don Central Dose Registers. Workshop. University of Toronto. European J of Cancer (Suppl 3), 33 April 1997*

situada a 1.100 km de distància. A Txernobyl, 203 persones, la majoria bombers i personal de la central ocupats en extingir l'incendi i, després, en construir el sarcòfag al voltant del reactor, van rebre dosis serioses d'irradiació. Trenta-dos van morir en els primers 50 dies, la majoria de cremades de causa tèrmica, no radioactiva, i força més en els mesos següents. Foren els anomenats "liquidadors", i el govern soviètic va crear una condecoració específica amb la qual els va distingir (Fig. 9). Per cert que, en ella, figuren dibuixats els raigs alfa, beta i gamma, però no els neutrons, responsables de bona part dels danys.

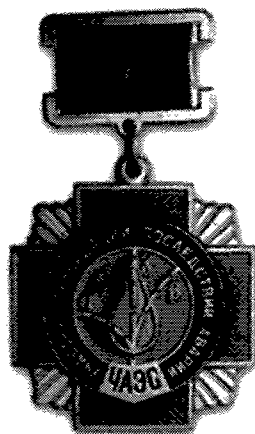


Fig. 9. Medalla concedida als anomenats "liquidadors" que amb el seu sacrifici van aconseguir limitar les conseqüències de l'accident de Txernobyl

La població de risc es va quantificar en 135.000 persones, la majoria de la ciutat veïna de Prypiat que va ser evacuada, de les que 24.000 foren considerades irradiades. Les 203 ciutades abans entraren en la categoria de seriosament irradiades en haver ultrapassat una dosi d'1Gy. En la majoria de persones no es disposava de

registres de dosimetria individual i es va haver de recórrer a dosimetria biològica estimativa, fonamentalment recomptes de limfòcits en sang, la cèl·lula més radiosensible de l'organisme i que s'ha anomenat el dosímetre biològic. Alhora, es valoraren els símptomes immediats (febre, nàusees, vòmits, etc.), els hemogrames, la limfopènia, les corbes de recuperació de les hipoplàsies i aplàsies medul·lars i fins i tot la presència d'anomalies cromosòmiques greus en els limfòcits, com són els dicèntrics. Les línies bàsiques del tractament, apart de les mesures de descontaminació prèvia, foren prevenció i tractament de les infeccions secundàries a la immunodepressió amb antibiòtics i càmeres estèrils, transplantament de moll d'os, nutrició parenteral, correcció dels desequilibris hidroelectrolítics i tractament de les cremades. És opinió assumida per alguns autors, que l'agressió combinada tèrmica i radiant va augmentar significativament la mortalitat. El risc tardà, especialment la cancerogènesi, és molt més difícil d'avaluar. A Anglaterra, la dosi col·lectiva estimada ha sigut de 3.000mSv/home. Si adoptem un factor de risc estàndard d'una mort extra per càncer per cada 100mSv/persona, obtenim un resultat de desenes de morts al llarg de tot el temps de vida estimat, que no es podrien discriminar epidemiològicament de la incidència natural, que és molt alta (400 casos/100.000 habitants/any). Autors com Svensson,⁴ van xifrar el nombre d'extra-càncers (no morts de càncer, ja que la majoria eren de tiroïdes produïts per iode radioactiu que són curables) en 1.300 a Europa, el que representa un augment de la incidència del 0.002%. No així a l'antiga URSS, on va fer una estimació de 50.000 càncers de més, que és un augment del 0.4% que donava idea de la gravetat de l'accident i del risc futur. En la població

⁴ Svensson H *The Chernobyl Accident. Its impact on Western Europe.* Breur Lecture. ESTRO. Lisbon 1987

evacuada, Roger i Clark⁵ van quantificar l'increment en un 0.6%. Anys després d'aquestes estimacions, ja podem saber quelcom més. La majoria de càncers radioinduits apareixen abans de 10-15 anys. El càncer de tiroides, degut al iode radioactiu, és, de bon tros, el més freqüent, degut al mecanisme fisiològic de concentració del iode en aquesta glàndula, que de fet s'utilitza en terapèutica. La contaminació es va produir per la via herba-ingesta per les vaques-concentració del iode a la llet-ingesta humana (sobretot nens)-concentració a tiroides- càncer. Afortunadament, la majoria de casos s'han detectat en fases inicials i s'han pogut guarir quirúrgicament. Altres càncers són mama, pulmó i leucèmies. De fet en l'informe fet per l'UNSCEAR, depenent de la ONU, l'any 2000 (14 després de l'accident) es confirma l'important increment en la incidència de càncer de tiroides en nens, però la de leucèmies i càncer en general no presenta increments. El de la AEN (Agència d'Energia Nuclear), publicat el 2002, parla d'un increment de la incidència de càncer entre un 0.004 i 0.01, totalment indetectable, molt inferior a les estimacions d'un 0.4% fetes el 1986. També hem de fer l'observació de què, arran de l'accident, la població ha sigut fortament vigilada i per tant la precisió diagnòstica major, detectant-se un cert nombre extra de càncers que, en altres circumstàncies, haurien passat desapercebuts.⁶

En el camp mèdic, els accidents de certa entitat han sigut pocs i la majoria en el camp de la radioteràpia. Quasi tots s'han produït al desmantellar generadors amb fonts de Cs137 o Co60 sense mesures de seguretat o per desconeixement que els capçals contenien les esmentades

⁵ Roger H Clark B *Reactor Accidents in Perspective*. Br J Radiol (1987) 60:1182-1188

⁶ Biete A *Accidentes nucleares: Peligros reales y potenciales*. Med Clin (Barc) 1988; 91: 699-701

fonts en ser retirats dels hospitals. Exemples en són els de Guaiana, el 1987 a Brasil o el de Mèxic a Ciudad Juarez. Segons l'associació de víctimes, moriren 60 persones i 6.000 foren exposades, però són dades no contrastades i que s'han de prendre amb certa precaució. Especial rellevància, en ser el més greu amb dades fiables, té el de Saragossa, el desembre de 1990. Una reparació defectuosa de l'accelerador lineal de radioteràpia va provocar una dosi excessiva amb electrons de pacients en tractament. Els metges donaren l'alerta en veure reaccions no esperades. Es van registrar 25 morts, però l'informe del CSN (Consejo de Seguridad Nuclear) només en reconeix 11 com directament atribuïbles a l'exposició excessiva. S'ha de tenir present que eren pacients oncològics, molts d'ells en tractament pal·liatiu. Sensible a aquest tema, la ESTRO (European Society for Therapeutic Radiology and Oncology) ja va dedicar la conferència de concessió de la medalla d'or el 2001 a l'extracció de lliçons en el camp de la radioteràpia oncològica.⁷

A la llum dels coneixements actuals, el risc d'exposició crònica dels treballadors de centrals nuclears i del personal sanitari de les instal·lacions radioactives és mínim si s'observen i compleixen estrictament les mesures legals de radioprotecció i molt inferior a d'altres ocupacions laborals. El risc d'accidents en centrals nuclears és difícilment quantificable, però evidentment reduït a la vista del nombre de reactors existents i els anys de funcionament. Així per exemple, Wright avalua el risc d'un terratrèmol intens a Sheffield en 1/10.000 anys, i el d'un accident molt greu en una central amb reactor d'aigua pressuritzada (PWR) en 1/10 milions d'anys, afegint que

⁷ Cosset J.M. *ESTRO Breur Gold medal Award Lecture 2001: Irradiation accidents-lessons for Oncology?*. Radiotherapy and Oncology (2002) 63; 1-10

disposem de plans d'emergència i evacuació molt més elaborats que per altres riscos com inundacions, terratrèmols, etc. Un minuciós estudi de Gilbert et al sobre 35.000 treballadors de plantes nuclears i militars seguits durant 21 anys no va poder demostrar cap correlació entre dosis rebudes i l'aparició de tumors sòlids o leucèmies, així com cap increment de la incidència real de càncer comparat amb l'estimada. Hatch i Susser estudiaren la incidència de càncer infantil en la població que viu a la rodalia d'una central nuclear i no van detectar cap augment significatiu. També és important, en l'àmbit sanitari, la recerca feta per Andersson et al en dos serveis de RDT de Dinamarca en el període 1954-1982. No es va poder demostrar cap augment en la incidència de càncer ni cap relació amb la dosi rebuda pels treballadors professionalment exposats (radioterapeutes, tècnics, físics, infermeria).

En la ja àmplia experiència acumulada s'observa que la implicació d'errors humans inexplicables, paradoxals o bé fallides tècniques greus per defectes en el disseny o incompliment de les especificacions tècniques i qualitat dels materials utilitzats ocupa un lloc molt important en les causes dels incidents i accidents (i no només en l'àmbit que ens ocupa!). Si aquests darrers es produeixen, les conseqüències, tan immediates com tardanes poden arribar a ser greus per a la població afectada i per l'ecosistema. D'altra banda, a més del risc d'exposició laboral i d'accident, hem de recordar que els reactors nuclears generen una quantitat important de residus radioactius d'alta activitat i llarg període de semidesintegració (barres de combustible esgotades) que presenten problemes seriosos de magatzematge i del que en parlarem més endavant.

Malgrat que el risc nuclear (excepte el bèl·lic, per raons òbvies) és limitat, ben estudiat i conegut i molt inferior a

altres, com fumar, conduir, treballar en la construcció, etc., la seva acceptació social és molt baixa, i s'ha convertit en un tema altament sensible. El risc nuclear d'usos pacífics és percebut en una enquesta poblacional com el més alt entre 30 factors diversos (alcohol, trànsit, tabac, ferrocarril, etc.). Si de forma objectiva quantifiquem el nombre de víctimes causat per cadascun d'ells a l'any a USA, el risc nuclear ocupa el lloc número 20, de 30 en sentit decreixent.

Diguem també que les mesures de protecció, que evidentment són cares i complexes, han d'extremar-se. A un avançat disseny tècnic dels reactors cal afegir un control de qualitat i d'especificacions exhaustiu dels materials utilitzats. La formació i entrenament del personal ha de ser intens, complet i mantingut, amb simulacres d'incidents i amb l'activació dels Plans d'emergència i la verificació de coneixement del Pla d'operació. Alhora, tot això s'ha de simultaniejar amb una educació pública eficaç per part de Protecció Civil i simulacres periòdics en la població de risc, així com disposar d'una sofisticada xarxa de detectors i una infraestructura òptima, tant sanitària com de vies d'evacuació. Afortunadament, les centrals disposen de centres mèdics de descontaminació i tractament molt ben equipats.

En la gènesi dels accidents quasi sempre hi intervenen factors repetitius, tant en l'àmbit que ens ocupa com en d'altres de l'activitat humana. Quan s'investiguen les causes, sovint es troben errors encadenats. Rar és l'accident degut a una causa única identificable. Els errors humans són molt freqüentment fruit, no de la manca de coneixement, sinó de la manca de mètode i de temps. Procediments operacionals perfectament redactats amb minuciositat, plans d'emergència exhaustius, a l'hora de la veritat no s'han seguit o bé s'han malinterpretat. Un dels fets que sovint es detecta, és la interpretació errònia de les

veritat no s'han seguit o bé s'han malinterpretat. Un dels fets que sovint es detecta, és la interpretació errònia de les instruccions, i que el comandament que les ha donades no n'ha verificat el compliment. Per tant és evident que l'entrenament de l'equip, la línia de comandament clara i ben establerta, l'existència de plans operacionals i d'emergència detallats i coneguts, i finalment, la verificació de la comprensió i el compliment de les instruccions, són fites fonamentals d'assolir si volem que el nivell de seguretat sigui l'òptim.

D'altra banda, la seguretat i les mesures de protecció són cares. No és fàcil d'establir el risc assumible, ja que el risc zero es una utopia. La inversió en mesures de seguretat sempre és més difícil d'aconseguir que no pas en mesures directament implicades en la producció, i, a més, encareixen el cost del producte final, habitualment, l'energia. En el cas de Txernobyl, és ben establert que el reactor tenia deficiències en el disseny tècnic, però la manca d'un búnquer de contenció, tenia més a veure probablement en l'estalvi que en la tecnologia. Si pensem que és quasi tan costós com el reactor, entendrem que el preu final del Kw/h d'electricitat fos clarament inferior al d'una central occidental. Si als interessos de les empreses finançadores o de l'estat afegim la possibilitat de la corrupció, que fa que no es compleixin al 100% les especificacions de seguretat en els materials, ja tenim uns ingredients que augmenten significativament la possibilitat d'un accident. Hem de tenir també present que moltes vegades s'han detectat mancances i errors en el manteniment. Les revisions exhaustives i les actuacions preventives en són una eina fonamental per assegurar una operativitat correcta i segura sota el control dels organismes reguladors de cada país.

LA PERCEPCIÓ SOCIAL DE LES RADIACIONS I L'ENERGIA NUCLEAR

Atès que les decisions polítiques i les inversions subsegüents a elles es veuen condicionades fortament no només per l'aplicació d'un programa o ideari sinó també pel ressò i la percepció social que tenen, es bo que dediquem unes ratlles a aquests aspectes en el tema que ens ocupa, és a dir les radiacions i, entre elles, fonamentalment, les ionitzants. Podem definir tres camps ben delimitats, el dels usos mèdics, el dels usos energètics i el dels usos militars.

a. USOS MÈDICS

En l'ampli camp actual dels usos mèdics de les RI, destaquen les seves utilitats en el diagnòstic d'innombrables malalties. Seria inconcebible una medicina sense exploracions radiològiques; molts diagnòstics serien força dificultosos, tardans o imprecisos. La sofisticació de les tècniques actuals, com ara la tomografia computoritzada o TAC, l'angioradiologia, la mamografia digital, etc., tenen un alt poder discriminatori i són de gran rendibilitat. Destaquem també les indicacions i avantatges de la novedosa radiologia intervencionista, que permet, guiada per la imatge radiològica, de fer puncions-biòpsia d'òrgans profunds com el fetge, reparar col·lapses dels cossos vertebrals (vertebroplàstia), drenar abscessos o desobstruir artèries coronàries amb plaques ateromatoses i trombes. Tants beneficis no obvien, tanmateix, que assenyallem alguns dubtes i interrogants envers el futur:

- La TAC, ideada i desenvolupada per Hounsfield el 1972, que es fa amb nombrosos talls, dóna una dosi de radiació no menyspreable, molt

superior a una radiografia de tòrax, a un volum molt ampli del cos en el cas d'exploracions de tòrax i/o abdomen. El risc de mutacions trameses a la descendència i cancerogènesi radioinduïda no és menyspreable i cal tenir-lo present en les indicacions a gent de menys de 50 anys o en edat reproductiva.

- L'increment exponencial en les exploracions radiològiques, sobretot TACs, no obeeix només a necessitats diagnòstiques reals, sinó que hi influeixen altres factors, com la demanda consumista en sanitat, associar moltes exploracions a medicina de més qualitat o escassa experiència del professional. De fet, es comprova que, a menys coneixements i entrenament professional, més exploracions es demanen i amb menys coherència amb la propedèutica. És el que se'n diu, en termes col·loquials professionals, la "perdigonada diagnòstica". Un altre factor dissortadament creixent és la pràctica de la "medicina defensiva", en la qual el metge s'escuda en moltes exploracions per tal de defensar-se davant d'una possible reclamació judicial. Hem d'intentar que el seguiment dels protocols diagnòstics validats per les societats científiques i l'autoritat sanitària, així com el bon criteri, el sentit de la mesura i la no adopció d'actituds defensives, evitin la proliferació injustificada d'exploracions radiològiques.

- El desenvolupament d'altres tecnologies que no utilitzen RI, com l'ecografia o la RMN (Ressonància Magnètica Nuclear) pot ser una alternativa vàlida en cada cop més ocasions.

- Hem de col·laborar tots en difondre el missatge global que en medicina “més” no vol dir “millor”.

- Cal tenir present que un bon nombre de radiografies es fan a gent sana. La legislació prohibeix, des de fa anys, les exploracions radiològiques preventives, per exemple en les escoles (Orden Ministerial de 12 de juliol de 1982 sobre exploracions radiològiques en Medicina i Higiene Escolar, BOE 183 de 12 d'agost). També l'article 8 de la Directiva 1997/Euratom de 30 de juny diu que cal evitar la proliferació innecessària d'equips radiològics, i prohibeix la realització d'exàmens fluoroscòpics sense intensificador d'imatges (que redueix sensiblement la dosi al pacient i al personal tècnic). També estableix criteris limitadors d'utilització en nens, programes de cribratge i tècniques que comportin dosis altes com la TAC o la radiologia intervencionista.

Podem dir, per concloure aquest apartat, que la percepció social és bona en els usos diagnòstics de les RI. La manca d'accidents i els beneficis coneguts fan que més aviat ens vegem forçats, tant els professionals com l'Administració, a instaurar mesures de contenció davant les indicacions no justificades o la demanda excessiva, sense entrar a comentar, ja que no és l'objecte d'aquest parlament, les despeses extres que provoca en el sistema sanitari, tant públic com privat. De fet, es considera que aproximadament un 45% de les exploracions radiològiques no són estrictament necessàries. Com molt bé assenyala Tobajas, es produeix un creixement exponencial en les

exploracions, sobretot les TACs.⁸ I una demostració d'aquesta realitat és la necessitat de la justificació de la sol·licitud que exigeix el RD 815/2001 de 13 de juliol sobre la justificació de l'ús de RI per a la protecció radiològica de les persones en ocasió d'exposicions mèdiques. Les exploracions de Medicina Nuclear (gammagrafies, tomografia per emissió de positrons (PET), etc., són molt més minoritàries i no es prescriuen ni es demanen injustificadament, i, per tant, no mereixen cap comentari específic.

En el camp de l'Oncologia Radioteràpica, les indicacions són ajustades, en la seva majoria, a pacients oncològics. La contribució de la RDT al control locoregional del càncer es innegable, sigui aïlladament o en associació a la cirurgia i/o quimioteràpia. Tampoc cal oblidar les indicacions pal·liatives, sobretot en metàstasis òssies, en què és un tractament antiàlgic i preventiu de la fractura de gran utilitat. Malgrat tot, la percepció social està per dessota dels beneficis obtinguts. Això pot ser pels següents motius:

- Com en tots els tractaments oncològics, hi ha un risc de complicacions greus en un petit percentatge de pacients, al voltant d'un 1-4%. El pacient tractat satisfactòriament i sense efectes secundaris no és notícia, passa desapercebut, a diferència del que en té.
- Els antics aparells de RDT convencional i cobaltoteràpia, apart de menys eficàcia terapèutica, produïen més toxicitat cutània permanent, molt visible

⁸ Tobajas L.M. *El Legado de Röntgen y Becquerel en la Medicina del Siglo XX. Beneficios y Riesgos*. Instituto de España. Real Academia de Medicina. Zaragoza. 2000

- S'han registrat accidents que han tingut gran transcendència mediàtica i han produït inquietud social. Ja hem comentat el més important, el de Saragossa. A més, sovint se n'ha fet un èmfasi excessiu i desproporcionat, sobretot si ho comparem amb danys similars causats amb altres procediments (quirúrgics, medicaments, etc.)

- Un bon exemple i recent de la distorsió informativa n'és l'article publicat al New York Times el propassat 24 de gener: *The Radiation Boom: Radiation Offers New Cures, and Ways to do Harm* (El boom de la radiació: La radiació ofereix nous mitjans de curar i de fer mal). En ell, es detallen amb tot luxe de detalls, inclòs els noms dels pacients, hospitals, etc., dos accidents per sobredosi en dos pacients que moren a conseqüència de la mateixa. Les causes foren per problemes tècnics dels aparells. Després, l'article s'estén en consideracions al voltant dels efectes secundaris, com si fossin el pa de cada dia, en tant que reconeix que estan dins dels marges acceptats per la comunitat científica com a risc inevitable amb la tecnologia a l'abast d'avui en dia. També identifica 621 errors "menors" al llarg de vuit anys. L'article ha sigut ràpidament contestat pel Dr. Williams, president d'ASTRO (American Society of Therapeutic Radiation and Oncology) amb els següents termes, que resumim: En 8 anys s'estima que mig milió de novaiorquesos han rebut un tractament de RDT, sumant un total de 13.6 milions de sessions. Per tant, els errors s'han detectat només en un 0.0046 de tractaments; o, dit en altres paraules, la RDT ha sigut segura i efectiva el 99.99% de vegades. Malgrat que un sol error és excessiu, recorda tot els sistemes de control de qualitat i d'entrenament i qualificació professional i

de procediments, que és molt superior als d'altres especialitats mèdiques.

b. Usos energètics

Aquest és probablement un dels camps més conflictius i on s'han generat, i encara continuen, els debats més encesos. Aquí, l'aiguabarreig de ciència, política, ecologia, legislació i economia és veritablement aclaparador. Alhora, també és on hi ha més discordança entre les opinions dels científics, i fins i tot dels polítics, i el que es diu o defensa oficialment o en àmbits privats. Entrem en l'àmbit, sempre relliscós i incòmode, del "políticament correcte", que, per cert, presenta variacions notables segons els temps, els governs o els països.

El debat energètic ultrapassa l'àmbit d'aquestes paraules. Aspectes com la obtenció d'energia, la dependència energètica exterior (per cert, l'espanyola és del 80% quan la mitjana europea ho és del 60%), el perfil d'estabilitat política dels països proveïdors, la distribució energètica interna, els costos de producció, els gravàmens impositius o els preus finals són exemples de la importància del tema i de les enceses discussions i preocupacions que genera.

Les possibilitats energètiques de la fissió nuclear, que, apart d'emetre energia en forma de radiacions corpusculars i/o electromagnètiques, també ho fa en forma de calor en grans quantitats, ja es van intuir des d'abans de la segona guerra mundial. Un cop finalitzada es van poder esmerçar més esforços en el desenvolupament pacífic. Recordem lemes de l'època, com ara "átomos para la paz", i d'altres. Els reactors nuclears provoquen una desintegració lenta i regulable de materials radioactius,

l'U235 n'és el més conegut, la qual és modulada per uns absorbents de neutrons que són les barres de grafit. L'aigua que circula en contacte amb les barres de combustible s'escalfa a alta temperatura, convertint-se en vapor a pressió a 120°. Aquest circuit primari, lògicament contaminat, escalfa per contacte un circuit secundari, alhora, un de terciari, fins que el doll de vapor a pressió fa girar les pales d'una turbina que genera electricitat. En els fons i de forma simplista, és una màquina de vapor on aquest no es produeix per la combustió de carbó o fuel sinó per la desintegració radioactiva. El reactor s'instal·la, per raons de seguretat, dins d'un búnquer o edifici de contenció, allunyat de la sala de turbines, que està en un edifici veí. Val a dir que els búnquers estan dissenyats per resistir impactes de míssils, i que l'espai aeri proper a les centrals nuclears és restringit (zona d'exclusió aèria). Atès que els països occidentals tenen les capacitats de producció hidroelèctrica saturades, que els embassaments tenen vida limitada en omplir-se de sediments i que el petroli i el gas són limitats i amb encariment progressiu, les centrals nuclears van semblar una bona solució, malgrat la complexitat tecnològica i les costoses mesures de seguretat que comportaven.

Actualment, al món hi ha 436 reactors funcionant, 104 d'ells a USA. La xifra ha estat estancada durant 20 anys (el 1993 n'hi havia 435) degut a les fortes inversions necessàries i a la forta controvèrsia política i social que s'ha produït. A Espanya, es va interrompre la construcció de centrals ja en el primer govern de Felipe González, fet que va obligar a repercutir la indemnització a les empreses d'electricitat en els consumidors i que encara, a hores d'ara, seguim pagant en el rebut de la llum (moratòria nuclear), amb un termini que s'amortitzava inicialment el 2020, i que s'ha avançat al 2015. Fins i tot es van produir atemptats com el de l'assassinat de l'enginyer Ryan, que treballava

com a enginyer en cap en la construcció de la central de Lemóniz, al País Basc. Avui per avui, la decisió de l'actual govern és ferma en la no autorització de noves centrals. Se n'han tancat dues definitivament per obsolescència cronològica i instrumental (Vandellòs I i Zorita), i s'han vist forçats a perllongar l'autorització d'operativitat a una altra (Garoña), degut a les necessitats energètiques del país. Les centrals projectades que se'n va aturar la construcció foren: Regodola, Sayago, Santillán, Lemóniz I i II, Escatrón I i II, Valdecaballeros I i II i Trillo II. La contribució el 1993 (abans del programa de renovables) de l'energia nuclear era del 35%.

Atès que alguns governs s'han adonat de la fragilitat de les energies renovables, ja que és evident que ara per ara la demanda elèctrica d'un país no pot dependre en la seva major part de què bufi el vent o el solejament sigui més o menys intens, s'ha tornat a pensar en l'energia nuclear com a contribució necessària, fiable i no productora de gasos d'efecte hivernacle. I així, hi al món 56 centrals en construcció, d'elles 20 a la Xina. I l'any actual, tant el president Obama d'Estats Units com el president Sarkozy de França han anunciat que reprenen el programa de construcció de centrals. Al món hi ha, segons l'Associació Nuclear Mundial, 142 projectes de noves centrals. No oblidem que, ja en l'actualitat, quasi el 70% de l'electricitat francesa és d'origen nuclear, i que Espanya en compra, per cert no pas a bon preu. O sigui que Espanya té electricitat nuclear, apart de la pròpia que és minoritària, per via indirecta.

Ara per ara la tecnologia produeix reactors amb un nivell de seguretat, rendibilitat i fiabilitat molt superior al de fa 30-40 anys. L'accident de Txernobyl també ha estimulat l'adopció de mesures de seguretat molt estrictes. Probablement estem davant d'un període de renovat

interès envers aquesta forma de producció d'electricitat, ja que les energies renovables són cares, fràgils i tenen un sostre. Els recursos disponibles de combustibles fòssils (gas natural i derivats del petroli) són limitats, cars i en mans de països políticament inestables, alhora que contaminants, ja que produeixen CO₂ en grans quantitats. El carbó queda en últim terme per altament contaminant (CO₂, pluja àcida per SO₂, etc.), encara que a Xina és un recurs energètic bàsic i àmpliament utilitzat, ateses les seves reserves abundants. Una problemàtica recent, de la que se n'ha parlat poc, és la dificultat de disposar de les quantitats d'urani necessari. És un element abundant, però en baixa concentració, i la seva extracció és cara i difícil. El 1993, USA i URSS firmen un protocol anomenat *Megatons to Megawatts* per desmuntar 20.000 caps nuclears dels míssils i aprofitar el combustible per usos civils de producció d'energia. Ara bé, el 2013 finalitza el programa i, per tant, l'estoc d'urani d'aquesta procedència. Al món s'utilitzen unes 67.000 tones anuals d'urani (usos civils i militars), de les que 46.000 provenen de la mineria. Malgrat la previsible pujada del preu (llevat que es desmantellin més capçals de míssils nuclears), hem de tenir present que el cost del combustible només suposa entre un 5 i un 10% del cost total de l'energia produïda i, per tant, el preu del Kw/h nuclear a penes se'n ressentiria. També pot succeir que en augmentar el preu de l'urani, mines que ara no són rendibles passaran a ser-ho. L'única alternativa a disposar d'una energia barata, il·limitada i no contaminant és la fusió nuclear. Malgrat la intensa recerca, les dificultats tècniques són encara molt elevades. Des de que es disposa d'un disseny novedós, fiable i eficient, fins que s'implanta a nivell mundial de forma estable, passa una mitjana de 30 a 40 anys. Els països subdesenvolupats necessiten electricitat per progressar i evidentment no es poden permetre de fer-ho amb les formes més cares de produir-la. Per tant, crec que hi ha debat per temps i que l'energia

nuclear encara és una solució de transició a considerar fora de actituds simplement ideològiques. Només com a exemple del canvi de pensament, el climatòleg de la NASA James Hansen i el fundador de Whole Earth Catalogue, Stewart Brand, han donat suport a la política de Obama de *“construcció d’una nova generació de reactors nuclears segurs i nets per combatre l’escalfament global. L’autèntic enemic són les centrals tèrmiques de carbó, i les renovables no tenen capacitat per cobrir el buit”*. Si el preu final de l’energia elèctrica d’origen nuclear de les noves centrals serà competitiu és una incògnita amb opinions contraposades.

Malgrat totes les argumentacions tècniques i científiques en aquest tema tan debatut, l’estat d’opinió social té una importància decisiva. Del discurs programàtic de les diverses formacions polítiques se’n deriven, en cas que arribin a governar, decisions que condicionen la política energètica al llarg d’anys. Ara per ara l’opinió popular considera aquesta producció elèctrica com d’alt risc i valora molt poc el progrés tecnològic i la seguretat actuals. Alhora, tampoc no es valora que és una alternativa no contaminant en no produir CO₂, gas suposadament responsable de l’anomenat canvi climàtic o, més ajustadament, escalfament global. Com en tots els aspectes de la vida humana, l’impacte psicològic i els missatges subliminals cal considerar-los. És evident que mostrar les torres de refrigeració de la central, que emeten vapor d’aigua que, en condensar-se es veu com si fos fum blanc, porta a pensar a moltes persones que són fums radioactius contaminants. També el tema dels residus, les barres de combustible ja exhaurides, que són altament radioactives, ha portat i porta molta inquietud. No cal insistir, ja que és prou conegut per tothom, en les polèmiques i enceses actituds i manifestacions que provoca la decisió de triar la localització del magatzem de residus de mitjana activitat al nostre país (l’existent a El Cabril és de curta activitat).

Imaginem el que passaria per a decidir sobre un de llarga activitat, que un dia o altre s'haurà de fer! El fet inversemblant és que des de la seva posada en marxa, les centrals (llevat la ja tancada de Vandellòs que els evacuava a França en aquell famós "tren nuclear") emmagatzemen les barres gastades en el fons d'una piscina a 9 metres de profunditat, des d'on emeten una lluminositat blavosa (efecte Cerenkov). La irradiació en superfície es quasi nul·la, degut a què l'aigua és el millor absorbent de neutrons. Una de les possibilitats més segures de magatzematge definitiu és dipositar-les en contenidors blindats a gran profunditat en mines abandonades, sense corrents d'aigua i en terreny geològicament estable. Diguem, de forma una mica distesa, que fins ara mai ha pujat a la superfície el material dipositat a cents metres sota terra. Per contra, està universalment prohibit, i es va fer far unes dècades, llençar bidons radioactius al mar (corrosió, desplaçaments per corrents marines, irradiació de la fauna marina, etc.). Com a conclusió, direm que el tema dels residus és més un tema de decisió política que tècnica, i com que la primera possibilitat a cap partit li aportarà vots, es va posposant d'un any a l'altre.

c. Usos militars

No és l'objecte d'aquest parlament comentar el desenvolupament de tots els estudis científics i tecnològics, tant a USA com a la URSS i a Alemanya per ser els primers a disposar d'un enginy nuclear que els concedís una superioritat militar indiscutible en la segona guerra mundial. Noms com Fermi, Oppenheimer, etc., quedaran per sempre més lligats a aquests esforços. El cas és que, dissortadament, es van fer servir contra objectius civils, al final de la guerra, a les ciutats japoneses d'Hiroshima i Nagasaki. L'explosió d'Hiroshima, el 6 d'agost de 1945, fou

provocada pel llançament d'una bomba d'Urani de 12.5kT (equivalent a 12.5 tones de TNT). En el radi de 500 metres de l'hipocentre la mortalitat instantània fou del 90% i, la immediata, del 98%. Es calculen aproximadament uns 140.000 morts. D'entre ells, menys del 25% ho foren per lesions degudes a la irradiació, tant immediata com a la derivada de la pluja radioactiva posterior. La major part de mortalitat fou provocada per l'ona expansiva i de succió posterior (compressió toràcica, dany pulmonar, fractures múltiples), la caiguda d'edificis, sobretot dels de formigó, la pulsio tèrmica (3.000°C a l'hipocentre, 500°C en un radi de 2 km) i les cremades degudes als incendis posteriors. A Nagasaki, l'explosió tingué lloc 3 dies més tard i la bomba fou de Plutoni i de major potència (22kT). Malgrat això, l'orografia actuà de barrera protectora i la mortalitat fou menor (uns 70.000 morts).

La situació posterior de "guerra freda" entre les dues superpotències féu que s'anessin incrementant i perfeccionant els arsenals nuclears, així com les explosions de proves. N'és un exemple el disseny de l'anomenada "bomba de neutrons", atribuït a S. Cohen el 1958. El primer assaig es portà a terme el 1963 al desert de Nevada (USA). La característica principal d'aquest enginy és que empra un sistema mixt fissió-fusió de baix rendiment explosiu, però d'alta emissió de radiacions ionitzants, primordialment neutrons accelerats. Alhora, la radioactivitat és de curta durada (menys de dos dies) comparada amb les bombes clàssiques de fissió. Les conseqüències pràctiques són que els danys estructurals i la contaminació del territori són molt menors i que, per contra, l'afectació dels éssers vius, encara que es trobin dins d'elements de protecció, és molt superior. No es coneix en detall els arsenals existents de bombes de neutrons ni quins països les posseeixen. La veritat és que tots els càlculs són estimatius, però sembla que el 99% de l'armament atòmic està en mans de Rússia i

d'Estats Units. Sabem del cert que altres nacions com França, Índia, Anglaterra, Xina, Pakistan, etc., en tenen. També coneixem els esforços d'Iran i Corea del Nord per fabricar-ne. L'estimació total de la potència destructora disponible entre armes estratègiques i tàctiques és d'uns 15.000 Mt, o sigui 15.000 milions de tones de TNT. L'explosió experimental més gran detonada ha estat a Novaya Zemlya (URSS) el 1961 amb 60Mt (250 cops més potent que la bomba d'Hiroshima!). A aquest potencial destructor terrorífic s'hi afegeixen, encara, dos problemes més: un és el mal estat de conservació de part de l'antic armament nuclear de l'antiga URSS per problemes econòmics, fet ben palès, per exemple, per Ucraïna. El risc d'explosió potser no hi és, però el de contaminació és ben real. L'altre és el perill que bombes nuclears de baixa potència (tàctiques) caiguin en mans de grups terroristes. La dificultat és adquirir el material radioactiu (urani o plutoni), la construcció del dispositiu no té cap dificultat extrema. De fet, hi ha algunes mancances de plutoni en l'arsenal rus que es desconeix on han anat a parar. Testimoni de la preocupació per aquest tema és la publicació el 2002 d'un opuscle sobre mesures a prendre pels professionals de la radiologia en resposta al terrorisme nuclear⁹

La potencialitat destructora de les armes atòmiques ha fet que la medicina hagi esmerçat esforços en progressar en el coneixement dels efectes de l'exposició a les RI i a estudiar possibles formes de protecció. Apart de plans sanitaris d'emergència i càlculs de víctimes potencials, als quals es va donar gran impuls a partir dels anys 50 del segle passat, s'ha investigat amb intensitat la descoberta de fàrmacs amb efecte radioprotector. Científics de l'hospital

⁹ American College of Radiology: *Disaster Preparedness for Radiology Professionals. Response to Radiological Terrorism*. Versió 2.1 2002

militar Walter Reed americà van sintetitzar l'amifostina, substància amb efectes radioprotectors en neutralitzar radicals lliures oxigenats amb els seus grups SH-. Un cop deixà de ser secret militar degut a la seva inoperància a posteriori de l'exposició, ha sigut utilitzada com a preventiu de toxicitat de xerostomia radioinduída en clínica humana.

Els estudiosos han vist que les conseqüències d'una guerra nuclear ultrapassen de bon tros els danys ja quantiosos dels efectes immediats. A les víctimes tardanes dels efectes crònics de les RI cal afegir els efectes sobre el clima. El 1815 l'erupció del volcà Tambora a Indonèsia va alliberar tal quantitat de cendres a l'atmosfera que l'opacitat a la penetració de la irradiació solar infraroja va produir un refredament planetari significatiu els dos anys posteriors. Anys després, l'explosió del volcà Krakatoa va repetir el fenomen, reduint sensiblement la fotosíntesi. Recordem que petits canvis globals poden produir grans alteracions locals. En el cas de múltiples explosions atòmiques amb els grans incendis subsegüents, les cendres emeses a l'atmosfera produirien el que s'anomena "*hivern nuclear*". En diversos models generats s'estima que la lluminositat seria semblant a la d'un dia plujós durant 2 o 3 mesos, amb greus efectes sobre la productivitat agrícola. Aquests fets han sigut divulgats al gran públic en diverses produccions cinematogràfiques. Recordem, a títol d'exemple, una de ben recent (estrenada el 2009) titulada "*Luz en el fin de los tiempos*" de John Hillcoat, basada en la novel·la "*The Road*" de Cormac McCarthy. Probablement la conscienciació popular i dels governants de les apocalíptiques conseqüències d'una confrontació nuclear a gran escala, ha tingut un efecte dissuasori en el desencadenament d'una altra guerra mundial. Però és evident que l'equilibri de la dissuasió sempre és inestable i, per tant, l'ideal a perseguir és la desaparició de les armes i,

sobretot, les de destrucció massiva, per més que sembli una utopia.

PARAULES FINALS

Com deia Albert Einstein, “ *cal canviar la manera de pensar de l’home si volem evitar la guerra nuclear*”. No és pas fàcil això. Ja una altra corporació científica prestigiosa a casa nostra, com és l’Acadèmia de Ciències Mèdiques de Catalunya i Balears, en un Editorial de la seva revista⁹ manifestava clarament: “*Cal evitar els horrors d’una guerra nuclear tot intentant aprofitar els beneficis d’una font d’energia que no està exempta de perills. La vella norma si vis pacem para bellum ha quedat reduïda a una fal·làcia ridículament tràgica, ja que la guerra nuclear comportaria la destrucció del planeta; per tant, l’únic antídote contra les armes atòmiques és treballar seriosament per a la seva anul·lació. No és honest destinar diners a la destrucció*”

En l’aspecte energètic, voldria recordar la frase de James Lovelock, prestigiós lluitador ecologista des de els anys 70 del segle passat, en unes declaracions fetes durant una visita a Espanya el 2007 afirma: “*La energia nuclear es la única alternativa viable para salvar a la Humanidad del cambio climático*¹⁰”. Si més no mentre no tinguem alternatives que no siguin només complementàries.

Aprofitem doncs de forma segura, eficaç i eficient els grans avantatges de la utilització de les RI en Medicina, tant en el diagnòstic com en la terapèutica; utilitzem, així mateix, les possibilitats de producció d’electricitat no

⁹ Battestini R, Aragon J, Armengol J, Biete A, Broggi M et al *Ann Med (Barc)* 1990; 76:263-265

¹⁰ El Mundo, 8 de mars de 2007., pag 38. Suplement de Ciència

generadora de CO₂ i seguim en la recerca de mètodes factibles de produir energia que pugui estar a l'abast de tothom. Un cop més l'àtom ens dona la solució: la fusió nuclear, ara per ara encara un somni.

BIBLIOGRAFIA DE REFERÈNCIA

- Alexander P.
Radiación Atómica y Vida
Acribia, Zaragoza, 1962
- ASTRO (American Society of >Therapeutic Radiology and
Oncology)
A Celebration of 50 Years.
ASTRO. Fairfax (USA). 2008
- Belloch V.
Significación biológica de la irradiación natural del cuerpo
humano.
Real Academia de Medicina de Valencia. Valencia, 1980
- Casas, F.
De la Röentgenologia a l'Oncologia Radioteràpica
Prasfarma. Barcelona, 1996
- Cobb Ch.
Living with Radiation
National Geographic, 175, 4, April 1989
- Hall E.
Radiobiology for the Radiologist
Lippincott, 6^a ed. Filadelfia, 2006
- Johns H, Cunningham J.
The Physics of Radiology
Charles Thomas, 4^a ed. Springfield, 1983

Jungk R.
Más Brillante que Mil Soles: Los hombres del átomo ante la
Historia y su conciencia.
Argos. Barcelona, 1959

Lozano M.
Nucleares, ¿ por qué no? Cómo afrontar el futuro de la
energía.
Mondadori, Barcelona, 2009

Medina RM
¿Curar el cáncer? Los orígenes de la radioterapia española
en el primer tercio del siglo XX
Universidad de Granada, 1996

Mould R
A Century of X-Rays and Radioactivity in Medicine
Institute of Physics Publishing. Bristol, 1995

Pedraza V.
Fundamentos científicos de la Radioterapia Oncológica
Real Academia de Medicina y Cirugía de Granada.
Granada, 1997

Pedraza V.
Mecanismos biológicos subyacentes a la acción terapéutica
de la radiación
Real Academia Nacional de Medicina. Madrid 2009

Perez C, Brady L.
Principles and Practice of Radiation Oncology
Lippincott, 5ª ed. Filadelfia, 2008

Petschen I
Las radiaciones ionizantes en la curación del cáncer
Real Academia de Medicina de Valencia. Valencia, 1995

Radiation Oncology: A Century of Progress and
Achievement: 1895-1995
ESTRO (European Society for Radiation Therapy and
Oncology)
Brussels, 1995

Rahm H.
Die Röntgentherapie des Chirurgen
Enke, Stuttgart, 1927

Selman J.
The Basic Physics of Radiation Therapy
Charles Thomas, 2^a ed. Springfield, 1976

Tobajas LM.
El legado de Röntgen y Becquerel en la Medicina del siglo
XX. Beneficios y riesgos.
Real Academia de Medicina. Zaragoza, 2000

DISCURS DE CONTESTACIÓ
PER L'ACADÈMIC NUMERARI

EXCM. SR. DR DAVID JOU I MIRABENT

Excel·lentíssim Sr. Degà-President,
Excel·lentíssims Senyors Acadèmics,
Excel·lentíssimes i Il·lustríssimes Autoritats,
Senyores i Senyors:

M'és un honor i una gran satisfacció donar la benvinguda a la nostra Reial Acadèmia de Doctors al professor Albert Biete Solà. Nascut a Barcelona el 1952, va estudiar medicina a la UAB, on es va llicenciar el 1975 i es va doctorar el 1982, amb una tesi sobre *La termografia i la patologia mamària*. Va ser professor de radioteràpia, oncologia i medicina nuclear d'aquesta Facultat, de la qual també fou Vicedegà, fins a 1988, data en què va passar a la Universitat de Barcelona. Actualment és catedràtic a la Facultat de Medicina de la Universitat de Barcelona, i cap del Servei d'Oncologia Radioteràpica de l'Hospital Clínic i Provincial de Barcelona.

Ha dut a terme activitat assistencial en els Hospitals de la Santa Creu i de Sant Pau i en l'Hospital Clínic i Provincial, on ha participat directament en la indicació, planificació, tractament, i control evolutiu d'uns quatre mil cinc-cents pacients, sobretot amb càncer de mama, ginecològics, de pròstata i de pell, a més d'altres patologies usuals. La seva obra investigadora abasta la pràctica clínica, especialment en braquiteràpia i quimioradio-

teràpia, i en medicina bàsica, amb aportacions a temes com ara radioprotecció cel·lular, ús de marcadors tumorals, resposta inflamatòria intestinal i la seva influència en la migració leucocitària, efectes antiinflamatoris de dosis baixes de radiació en models intestinals, irradiació amb radiació de sincrotró i nanopartícules de cèl·lules normals o de línies tumorals. Aquesta investigació es reflecteix, a més de en la qualitat de la seva pràctica clínica, en uns cent-cinquanta articles de recerca en revistes especialitzades, moltes d'elles de difusió internacional, unes dues-centes ponències en congressos nacionals i internacionals, en el llibre *Radioterapia en el tratamiento del càncer* (1990), del qual és autor, i en una cinquantena d'aportacions a llibres col·lectius. Ha estat professor d'uns cent-vint cursos avançats de doctorat i d'actualització i ha dirigit deu tesis doctorals.

És membre del Grup de Radioteràpia de la *European Organization for Research and Treatment of Cancer* i un dels membres fundadors del Grup d'Investigació clínica en oncologia radioteràpica d'Espanya. Ha participat en nombroses comissions sobre estàndards de protecció i seguretat radioteràpiques, en comissions avaluadores de projectes de recerca, i en una quinzena de comitès organitzadors de congressos sobre l'especialitat. És membre del consell de redacció de revistes especialitzades com ara *Oncología*, *Radiología*, *Neoplasia*, *Radiotherapy and oncology*, *European Journal of Cancer*. Entre d'altres distincions, ha rebut premis als millors treballs en oncologia, de la Societat Catalano-Balear d'Oncologia i de l'Acadèmia de Ciències Mèdiques de Catalunya i Balears, i medalles de la Creu Roja Espanyola, de l'Associació Espanyola de Radioteràpia i Oncologia, i de la Societat Espanyola d'Oncologia Radioteràpica.

Indubtablement, l'ingrés del professor Albert Biete enriqueix la nostra Reial Acadèmia amb un membre actiu i de gran prestigi, i que, segons confessa, troba atractiva de la nostra entitat la seva interdisciplinarietat, a la qual certament podrà contribuir.

Com que, entre la diversitat de temes de la meua docència universitària, les circumstàncies m'ha dut a dedicar força atenció a la biofísica i la física per a biòlegs, he llegit i he escoltat el discurs del professor Biete amb autèntica avidesa. El seu discurs, com han pogut constatar, és clar, ben construït, àgil, informatiu, crític, actualíssim, basat en una llarga trajectòria de pràctica clínica i de recerca fonamental. En escoltar-lo examinar tan ponderadament i amb tant de coneixement els riscos i les promeses de l'energia nuclear, he sentit recança pel nostre país, tan desorientat en aquestes qüestions, tan poc donat al plantejament serè i racional dels temes energètics, i de tants d'altres, perdut en una emotivitat sorollosa i simplista, i en una arrogància indocumentada i dogmàtica en què les lleis de la física semblen no tenir cap mena de rellevància enfront de les certeses apriorístiques aparentment dignes de més crèdit, un país en què molts polítics intenten captar amb els afalacs de la demagògia els vots que no saben guanyar amb la serietat, amb el rigor de la gestió quotidiana, amb la lucidesa en el diagnòstic dels problemes, ni amb la qualitat de les solucions proposades. Però prefereixo dedicar la meua resposta a altres temes menys polèmics, a tres aspectes que m'ha suggerit la lectura del seu discurs.

En primer lloc, la relació entre la recerca fonamental d'avui i la medicina de demà. La utilització de les radiacions ionitzants en l'obtenció d'imatges, en l'examen clínic i en la terapèutica és una de les parts més visibles de la frontera entre la medicina i la física. Però em plau insistir en l'amplitud i dinamisme d'aquesta frontera: la

ressonància magnètica nuclear, la tomografia d'emissió de positrons, la tomografia axial computadoritzada, els acceleradors d'electrons i els sincrotrons, són altres aspectes que ja han estat esmentats en el discurs. A ells podríem afegir l'ús d'ultrasons en l'ecografia, en l'exploració Doppler dels fluxos sanguinis, o en la litotrícia; les tècniques òptiques que van des l'òptica clàssica fins a la utilització dels làsers i de les fibres òptiques, que permeten actualment fer tantes intervencions no invasives. Podríem esmentar l'electrocardiografia, l'electroencefalografia i la magnetoencefalografia; l'ús de microelèctrodes i micropipetes, que han aportat tant al coneixement dels processos bàsics del sistema nerviós, a les promeses de la nanotecnologia, a la rellevància de la física en la biologia molecular i cel·lular, amb l'estructura de proteïnes, la microfluídica, la micromecànica, la biomecànica, o a la fisiologia, especialment en el funcionament del sistema nerviós, vascular i respiratori, i el gran univers del cervell. Per acabar aquesta panoràmica esquemàtica de les relacions entre física i medicina, em plau deixar constància que el dia 22 de març va ser inaugurat a Cerdanyola, a pocs metres del campus de la UAB, el gran sincrotró, la instal·lació científica més gran, actualment, del Sud d'Europa, i que esperem que ajudi a potenciar la força i visibilitat de la recerca en el nostre país i les relacions entre ciència fonamental i desenvolupament aplicats, en nanotecnologia, en recerca farmacèutica, en ciència de materials, en biologia molecular i en medicina.

Però com que el Dr. Biete s'ha referit en alguns moments a les patologies mamàries, trobo interessant comentar una relació curiosa entre la detecció dels neutrins i les mamografies. Els neutrins són unes partícules neutres, de massa molt petita i sense interacció nuclear forta, produïdes amb gran abundància del Sol -cada cop que quatre nuclis d'hidrogen donen per fusió nuclear un nucli

d'heli-. Els neutrins són una de les partícules més difícils de detectar. Milers de milions d'ells travessen la Terra cada segon. La principal instal·lació per a detectar els neutrins solars i còsmics és en una gran mina a dos quilòmetres sota terra, reconvertida en una gran piscina, amb milions de litres d'aigua puríssima. Quan els neutrins interaccionen, només uns pocs per hora, amb l'oxigen de l'aigua, produeixen una reacció nuclear en què s'emet un fotó, que és detectat per uns fotodetectors molt sensibles que entapissen les parets d'aquesta immensa cavitat. Curiosament, des d'aquesta profunditat s'observa els neutrins procedents del centre del Sol, uns dotze minuts després que hi hagin estat produïts, a uns pocs milers de quilòmetres del nucli del Sol. En canvi, els fotons produïts en aquella zona, on tenen lloc les reaccions nuclears, tarden més de mil anys a sortir del Sol. Aquestes observacions tan astrofísiques i de partícules elementals han estimulat la construcció de fotodetectors extremadament sensibles que actualment s'apliquen a la mamografia, i permeten aconseguir imatges de més definició i més qualitat general amb menys quantitat de radiació i, per tant, amb menys perill per a les dones que se sotmeten a la prova. La física, doncs, duu a relacions insospitades: voler observar unes partícules procedents del Sol permet, a la llarga, millorar l'observació de la irrigació sanguínia en les mames. El *Càntic dels Càntics*, que conté metàfores tan suggestives sobre les sines femenines Benvolgut Dr. Biete -¿Qui és aquesta que s'aboca com l'aurora;/bella com la lluna, resplendent col el sol,/terrible com els esquadrans amb estendards?-, no rebutjaria aquesta metàfora astral, suggerida per les sinuoses complexitats dels camins de la física.

El segon aspecte que m'ha suggerit el tema de les radiacions ionitzants i la vida es refereix a la dimensió estel·lar i planetària del problema. Aquesta relació és un

tema rellevant en les fronteres actuals de l'astrobiologia, que és la ciència que estudia les condicions estel·lars i planetàries que cal per a l'existència de vida. Una part de la radiació de les estrelles és radiació ionitzant, molt energètica, com ara la radiació ultraviolada. Aquesta radiació ionitza o destrueix molècules d'interès biològic, i produeix radicals lliures que afecten les cèl·lules i malmeten el seu funcionament, fins a arribar a produir-ne la mort. Així, una protecció adequada contra aquesta radiació és necessària per tal que hi pugui haver vida en la superfície del planeta. Així, en la història de la Terra, la vida no va sortir de l'aigua fins que hi hagué en l'atmosfera prou oxigen perquè es produís una capa d'ozó en les altures. Això fou possible com a conseqüència de l'inici de la fotosíntesi, dos mil milions d'anys abans, i que de mica en mica anà alliberant l'oxigen contingut fins llavors en el diòxid de carboni. L'ocupació de la superfície terrestre es començà a produir fa uns cinc-cents milions d'anys, en l'època geològica anomenada Cambrià, que ens ha deixat el testimoni fòssil d'una de les grans explosions d'exploració de la vida. Si no hi hagués hagut la fotosíntesi, la vida hauria restat confinada en l'aigua. Així, tal com el Dr. Biete parla de radioprotecció cel·lular, també podríem parlar de radioprotecció planetària. El tema té una gran rellevància per a les possibilitats de vida, com hem vist, i suggereix que en les zones centrals de la galàxia no hi ha planetes habitats, ja que en aquella zona la gran densitat d'estrelles i de radiació ionitzant destruiria els organismes que intentessin abandonar la protecció de l'aigua.

Per acabar, i ja que el Dr. Biete ha glossat la interdisciplinarietat com a atractiu de la nostra Reial Acadèmia, vull fer alguns breus apunts de caire literari, motivats, en part, pel fet de commemorar actualment els vint-i-cinc anys de la mort del gran escriptor Salvador Espriu, que dedicà la seva primera obra, publicada als

disset anys, el *Dr. Rip*, a la presència devastadora del càncer. L'obra és una mirada desolada de la condició humana, a partir d'un metge que s'autodiagnostica un càncer gàstric. La primera versió de la breu novel·la era encara molt vacil·lant, però Espriu la recuperà uns quaranta anys després, amb el rigor literari, la sobrietat i el tarannà incisiu que li eren propis. Seria curiós rastrejar la presència del càncer en la literatura -i, més concretament, de les impressions que la radioteràpia produeix en els pacients-. Hi ha, per exemple, una antologia de poesia femenina sobre el càncer de mama -Leatrice H Lishitz, *Her soul beneath the bone: women's poetry on breast cancer* (Univ Illinois, 1988) -; parlen del càncer Poetes com Gottfried Benn -en el llibre *Morgue*, de 1918- , o William Carlos Williams -en el llibre *Autobiography*, de 1951-, o Miroslav Holub - *Intensive care: selected and new poems*. En parlen novel·listes com Sir Arthur Conan Doyle, en les narracions breus *Round the red lamp* (1894) o com Thomas Mann -a *El cigne negre*, de 1953-; i en parlen assagistes com Simone de Beauvoir, en evocar la mort de la seva mare en la seva autobiografia-, o Barbara Ehrenreich -a *Welcome to Cancerland*-, o Susan Sontag, en el conegut assaig *La malaltia com a metàfora*, en què compara les metàfores de la tuberculosi, referents habitualment a passió i sensibilitat, amb les suscidades pel càncer i per altres malalties. Potser podríem tractar el tema en alguna altra sessió de la Reial Acadèmia, ja que ara no és pas moment de fer-ho.

El discurs del Dr. Biete em va suggerir com acabar la meva resposta: tal com ell ha començat la seva intervenció, evocant el descobriment de Roentgen. El Dr. Biete lamentava el poc ressò que tingué el centenari del descobriment dels raigs X. Aquella ocasió, però, em va inspirar un poema sobre els raigs X, d'homenatge a Roentgen, que poden trobar en el meu llibre de poesia *L'èxtasi i el càlcul*, i que em plau llegir ara en homenatge no

tan sols a Roentgen, sinó també a tots els qui, des d'aquell descobriment, han servit la humanitat amb l'exploració i l'ús de les radiacions ionitzants, tal com el nou membre de la nostra Reial Acadèmia:

RAIGS X

Sabiem un verd contrallum, translúcid i tendre: les fulles al sol, filigranes de vasos, un laberint ordenat i subtil,

però no pas nosaltres: impenetrables a la llum, opacs, amb tot l'interior a l'ombra sempre, llevat que, amb violència, el bisturí o el ganivet obrissin un camí dolorós a la mirada.

Però mireu la premsa de Viena, el gener de 1896: aquesta imatge és una mà, la carn és una aurèola invisible i els ossos, espectrals, hi apareixen contundents, com tronquets o com arrels,

i l'anell de casament sembla flotar, en una estranya ingravidesa, com si ara l'anul·lar s'hagués tornat una mena de Saturn, per obra d'un tal Röntgen.

En aquesta imatge conflueixen vida i mort: qui havia vist sense morir una mà tan nua? Però la mà no pateix pas, sura, es mou davant de la pantalla,

i la carn és com la boira de tardor en els carrers il·luminats, quan els troncs deixen una ombra allargadíssima i àeria, i copia de les fulles la verdor fosforescent.

Ara, l'os trencat encaixarà perfectament, però caldrà més subtilesa, més contrast, per fer visible la finor d'altres detalls més delicats, en un joc d'ombres i clarors,

caldrà aprendre a pintar l'interior com els artistes han jugat amb la llum sobre la cara, injectar líquids estranys per fer visible l'entrellat d'arterioles i de venes, per vestir aquesta nuesa amb un parrac de laberint.

No tot serà serenitat en el dictamen de les ombres: obstinats, refusarem que aquest indici de dolor pugui tornar-se en la pantalla l'evidència d'un tumor, una punyent malignitat devastadora. Aquesta llum serà sincera però amarga.

Però ara no hi penseu, contempleu aquesta imatge, aquesta mà que us ofereix, com una fruita, una llum misteriosa que us havia estat prohibida; fruïu, per un instant, d'aquesta transparència que us despulla del mortal. I recupereu, després, la carn, l'opacitat, el pes, la solidesa.

(David Jou, L'èxtasi i el càlcul, edicions Columna, 2002)

Moltes gràcies per la seva atenció, i sigui càlidament benvingut el nou Acadèmic.

David Jou

ÍNDIX

Salutació.....	9
Introducció.....	11
Antecedents històrics. El llarg camí de la descoberta.....	13
Conceptes i generalitats sobre les radiacions ...	21
Fonaments radiobiològics.....	25
La radioprotecció.....	35
El desenvolupament tecnologic. La Radioteràpia externa com exemple	37
Els accidents i usos destructius	48
La percepció social de les radiacions i l'energia solar.....	60
Paraules finals.....	74
Bibliografia de referència.....	77
Discurs de contestació	81

PUBLICACIONES DE LA REIAL ACADÈMIA DE DOCTORS

Directori 1991

Los tejidos tradicionales en las poblaciones pirenaicas (Discurs de promoció a acadèmic numerari de l'Excm. Sr. Eduardo de Aysa Satué, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm. Sr. Josep A. Plana i Castellví, Doctor en Geografia i Història) 1992.

La tradición jurídica catalana (Conferència magistral de l'acadèmic de número Excm. Sr. Josep Joan Pintó i Ruiz, Doctor en Dret, en la Solemne Sessió d'Apertura de Curs 1992-1993, que fou presidida per SS.MM. el Rei Joan Carles I i la Reina Sofia) 1992.

La identidad étnica (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Ángel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Ma. Pou d'Avilés, Doctor en Dret) 1993.

Els laboratoris d'assaig i el mercat interior; Importància i nova concepció (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Pere Miró i Plans, Doctor en Ciències Químiques, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Ma. Simón i Tor, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1993.

Contribución al estudio de las Bacteriemias (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Il·lm. Sr. Miquel Marí i Tur, Doctor en Farmàcia, i contestació per l'Excm. Sr. Manuel Subirana i Cantarell, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1993.

Realitat i futur del tractament de la hipertròfia benigna de pròstata (Discurs de promoció a acadèmic numerari de l'Excm. Sr. Joaquim Gironella i Coll, Doctor en Medicina i Cirurgia i contestació per l'Excm. Sr. Albert Casellas i Condom, Doctor en Medicina i Cirurgia i President del Col·legi de Metges de Girona) 1994.

La seguridad jurídica en nuestro tiempo. ¿Mito o realidad? (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. José Méndez Pérez, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm. Sr. Ángel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres) 1994.

La transició demogràfica a Catalunya i a Balears (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Tomàs Vidal i Bendito, Doctor en Filosofia i Lletres, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Ferrer i Bernard, Doctor en Psicologia) 1994.

L'art d'ensenyar i d'aprendre (Discurs de promoció a acadèmic numerari de l'Excm. Sr. Pau Umbert i Millet, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm. Sr. Agustín Luna Serrano, Doctor en Dret) 1995.

Sessió necrològica en record de l'Excm. Sr. Lluís Dolcet i Boxeres, Doctor en Medicina i Cirurgia i Degà-emèrit de la Reial Acadèmia de Doctors, que morí el 21 de gener de 1994. Enaltiren la seva personalitat els acadèmics de número Excms. Srs. Drs. Ricard Garcia i Vallès, Josep Ma. Simón i Tor i Albert Casellas i Condom. 1995.

La Unió Europea com a creació del geni polític d'Europa (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Jordi Garcia-Petit i Pàmies, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Llort i Brull, Doctor en Ciències Econòmiques) 1995.

La explosión innovadora de los mercados financieros (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Il·lm. Sr. Emilio Soldevilla García, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresarials, i contestació per l'Excm. Sr. José Méndez Pérez, Doctor en Dret) 1995.

La cultura com a part integrant de l'Olimpisme (Discurs d'ingrés com a acadèmic d'Honor de l'Excm. Sr. Joan Antoni Samaranch i Torelló, Marquès de Samaranch, i contestació per l'Excm. Sr. Jaume Gil Aluja, Doctor en Ciències Econòmiques) 1995.

Medicina i Tecnologia en el context històric (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Felip Albert Cid i Rafael, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm. Sr. Àngel Aguirre Baztán) 1995.

Els sòlids platònics (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excm. Sra. Pilar Bayer i Isant, Doctora en Matemàtiques, i contestació per l'Excm. Sr. Ricard Garcia i Vallès, Doctor en Dret) 1996.

La normalització en Bioquímica Clínica (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Xavier Fuentes i Arderiu, Doctor en Farmàcia, i contestació per l'Excm. Sr. Tomàs Vidal i Bendo, Doctor en Geografia) 1996.

L'entropia en dos finals de segle (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. David Jou i Mirabent, Doctor en Ciències Físiques, i contestació per l'Excm. Sr. Pere Miró i Plans, Doctor en Ciències Químiques) 1996.

Vida i música (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Carles Ballús i Pascual, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Ma. Espadaler i Medina, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1996.

La diferencia entre los pueblos (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Il·lm. Sr. Sebastià Trías Mercant, Doctor en Filosofia i Lletres, i contestació per l'Excm. Sr. Àngel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres) 1996.

L'aventura del pensament teològic (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Josep Gil i Ribas, Doctor en Teologia, i contestació per l'Excm. Sr. David Jou i Mirabent, Doctor en Ciències Físiques) 1996.

El derecho del siglo XXI (Discurs d'ingrés com a acadèmic d'Honor de l'Excm. Sr. Dr. Rafael Caldera, President de Venezuela, i contestació per l'Excm. Sr. Àngel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres) 1996.

L'ordre dels sistemes desordenats (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Josep Ma. Costa i Torres, Doctor en Ciències Químiques, i contestació per l'Excm. Sr. Joan Bassegoda i Novell, Doctor en Arquitectura) 1997.

Un clam per a l'ocupació (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Isidre Fainé i Casas, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm. Sr. Joan Bassegoda i Nonell, Doctor en Arquitectura) 1997.

Rosalía de Castro y Jacinto Verdaguer, visión comparada (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Jaime M. de Castro Fernández, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm. Sr. Pau Umbert i Millet, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1998.

La nueva estrategia internacional para el desarrollo (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Santiago Ripol i Carulla, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm. Sr. Joaquim Gironella i Coll, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1998.

El aura de los números (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports, i contestació per l'Excm. Sr. David Jou i Mirabent, Doctor en Ciències Físiques) 1998.

Nova recerca en Ciències de la Salut a Catalunya (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excm. Sra. Anna Maria Carmona i Cornet, Doctora en Farmàcia, i contestació per l'Excm. Josep Ma. Costa i Torres, Doctor en Ciències Químiques) 1999.

Dilemes dinàmics en l'àmbit social (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Albert Biayna i Mulet, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Ma. Costa i Torres, Doctor en Ciències Químiques) 1999.

Mercats i competència: efectes de liberalització i la desregulació sobre l'eficàcia econòmica i el benestar (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Amadeu Petitbó i Juan, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm. Sr. Jaime M. de Castro Fernández, Doctor en Dret) 1999.

Epidèmias de asma en Barcelona por inhalaci3n de polvo de soja (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excm. Sra. Ma. José Rodrigo Anoro, Doctora en Medicina, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Lloret i Brull, Doctor en Ciències Econòmiques) 1999.

Hacia una evaluaci3n de la actividad cotidiana y su contexto: ¿Presente o futuro para la metodologí? (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excm. Sra. Maria Teresa Anguera Argilaga, Doctora en Filosofia i Lletres (Psicologia) i contestació per l'Excm. Sr. Josep A. Plana i Castellví, Doctor en Geografia i Història) 1999.

Directori 2000

Génesis de una teorí de la incertidumbre. Acte d'imposici3 de la Gran Creu de l'Orde d'Alfons X el Savi a l'Excm. Sr. Jaume Gil-Aluja, Doctor en Ciències Econòmiques i Financeres) 2000.

Antonio de Capmany: el primer historiador moderno del Derecho Mercantil (discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Xabier Añoveros Trías de Bes, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm. Sr. Santiago Dexeus i Trías de Bes, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2000.

La medicina de la calidad de vida (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Luís Rojas Marcos, Doctor en Psicologia, i contestació per l'Excm. Sr. Àngel Aguirre Baztán, Doctor en psicologia) 2000.

Pour une science touristique: la tourismologie (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Il·lm. Sr. Jean-Michel Hoerner, Doctor en Lletres i President de la Universitat de Perpinyà, i contestació per l'Excm. Sr. Jaume Gil-Aluja, Doctor en Ciències Econòmiques) 2000.

Virus, virus entèrics, virus de l'hepatitis A (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Albert Bosch i Navarro, Doctor en Ciències Biològiques, i contestació per l'Excm. Sr. Pere Costa i Batllori, Doctor en Veterinària) 2000.

Mobilitat urbana, medi ambient i automòbil. Un desafiament tecnològic permanent (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Pere de Esteban Altirriba, Doctor en Enginyeria Industrial, i contestació per l'Excm. Sr. Carlos Dante Heredia García, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2001.

El rei, el burgès i el cronista: una història barcelonina del segle XIII (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. José Enrique Ruiz-Domènec, Doctor en Història, i contestació per l'Excm. Sr. Felip Albert Cid i Rafael, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2001.

La informació, un concepte clau per a la ciència contemporània (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Salvador Alsius i Clavera, Doctor en Ciències de la Informació, i contestació per l'Excm. Sr. Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports) 2001.

La drogaaddicció com a procés psicobiològic (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Miquel Sánchez-Turet, Doctor en Ciències Biològiques, i contestació per l'Excm. Sr. Pedro de Esteban Altirriba, Doctor en Enginyeria Industrial) 2001.

Un univers turbulent (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Jordi Isern i Vilaboy, Doctor en Física, i contestació per l'Excm. Sra. Maria Teresa Anguera Argilaga, Doctora en Psicologia) 2002.

L'envelliment del cervell humà (Discurs de promoció a acadèmic numerari de l'Excm. Sr. Jordi Cervós i Navarro, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Ma. Pou d'Avilés, Doctor en Dret) 2002.

Les telecomunicacions en la societat de la informació (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Àngel Cardama Aznar, Doctor en Enginyeria de Telecomunicacions, i contestació per l'Excm. Sr. Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports) 2002.

La veritat matemàtica (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Josep Pla i Carrera, doctor en Matemàtiques, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Ma. Costa i Torres, Doctor en Ciències Químiques) 2003.

L'humanisme essencial de l'arquitectura moderna (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Helio Piñón i Pallarés, Doctor en Arquitectura, i contestació per l'Excm. Sr. Xabier Añoveros Trías de Bes, Doctor en Dret) 2003.

De l'economia política a l'economia constitucional (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Joan Francesc Corona i Ramon, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresariales, i contestació per l'Excm. Sr. Xavier Iglesias i Guiu, Doctor en Medicina) 2003.

Temperància i empatia, factors de pau (Conferència dictada en el curs del cicle de la Cultura de la Pau per el Molt Honorable Senyor Jordi Pujol, President de la Generalitat de Catalunya, 2001) 2003.

Reflexions sobre resistència bacteriana als antibiòtics (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excm. Sra. Ma. de los Angeles Calvo i Torras, Doctora en Farmàcia i Veterinària, i contestació per l'Excm. Sr. Pere Costa i Batllori, Doctor en Veterinària) 2003.

La transformació del negoci jurídic como consecuencia de las nuevas tecnologías de la información (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Rafael Mateu de Ros, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm. Sr. Jaime Manuel de Castro Fernández, Doctor en Dret) 2004.

La gestión estratégica del inmovilizado (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excm. Sra. Anna Maria Gil Lafuente, Doctora en Ciències Econòmiques i Empresariales, i contestació per l'Excm. Sr. Josep J. Pintó i Ruiz, Doctor en Dret.

Los costes biológicos, sociales y económicos del envejecimiento cerebral (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Félix F. Cruz-Sánchez, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Pla i Carrera, Doctor en Matemàtiques) 2004.

El conocimiento glaciar de Sierra Nevada. De la descripción ilustrada del siglo XVIII a la explicación científica actual. (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Antonio Gómez Ortiz, Doctor en Geografia, i contestació per l'acadèmica de número Excm. Sra. Maria Teresa Anguera Argilaga, Doctora en Filosofia i Lletres (Psicologia) 2004.

Los beneficios de la consolidación fiscal: una comparativa internacional (Discurs de recepció com a acadèmic d'Honor de l'Excm. Sr. Rodrigo de Rato y Figaredo, Director-Gerent del Fons Monetari Internacional. El seu padrí d'investidura és l'acadèmic de número Excm. Sr. Jaime Manuel de Castro Fernández, Doctor en Dret) 2004.

Evolución histórica del trabajo de la mujer hasta nuestros días (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Eduardo Alemany Zaragoza, Doctor en Dret, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Rafel Orozco i Delclós, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2004.

Geotecnia: una ciencia para el comportamiento del terreno (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Antonio Gens Solé, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports) 2005.

Sessió acadèmica a Perpinyà, on actuen com a ponents; Excm. Sra. Anna Maria Gil Lafuente, Doctora en Ciències Econòmiques i Empresariales i Excm. Sr. Jaume Gil-Aluja, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresariales: "Nouvelles perspectives de la recherche scientifique en économie et gestion"; Excm. Sr. Rafel Orozco i Delclós, Doctor en Medicina i Cirurgia: "L'impacte mèdic i social de les cèl·lules mare"; Excm. Sra. Anna Maria Carmona i Cornet, Doctora en Farmàcia: "Nouvelles stratégies oncologiques"; Excm. Sr. Pere Costa i Batllori, Doctor en Veterinària: "Les résistences bactériennes a les antibiotiques". 2005.

Los procesos de concentración empresarial en un mercado globalizado y la consideración del individuo (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Fernando Casado Juan, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresariales, i contestació de l'Excm. Sr. Josep Ma. Costa i Torres, Doctor en Ciències Químiques) 2005.

"Son nou de flors els rams li renc" (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Jaume Vallcorba Plana, Doctor en Filosofia i Lletres (Secció Filologia Hispànica), i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. José Enrique Ruíz-Domènec, Doctor en Filosofia i Lletres) 2005.

Historia de la anestesia quirúrgica y aportación española más relevante (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Vicente A. Gancedo Rodríguez, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Josep Llori i Brull, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresariales) 2006.

El amor y el desamor en las parejas de hoy (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Paulino Castells Cuixart, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Joan Trayter i Garcia, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresariales) 2006.

El fenomen mundial de la deslocalització com a instrument de reestructuració empresarial (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Alfredo Rocafort i Nicolau, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresariales, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Isidre Fainé i Casas, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresariales) 2006.

Biomaterials per a dispositius implantables en l'organisme. Punt de trobada en la Historia de la Medicina i Cirurgia i de la Tecnologia dels Materials (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Josep Anton Planell i Estany, Doctor en Ciències Físiques, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Pere Costa i Batllori, Doctor en Veterinària) 2006.

La ciència a l'Enginyeria: El llegat de l'école polytechnique. (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Xavier Oliver i Olivella, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Josep Pla i Carrera, Doctor en Matemàtiques) 2006.

El voluntariat: Un model de mecenatge pel segle XXI. (Discurs d'ingrés de l'acadèmica de número Excm. Sra. Rosamari Cammany Dorr, Doctora en Sociologia de la Salut, i contestació per l'Excm. Sra. Anna Maria Carmona i Cornet, Doctora en Farmàcia) 2007.

El factor religiós en el proceso de adhesión de Turquia a la Unión Europea. (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Josep Maria Ferré i Martí, Doctor en Dret, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Carlos Dante Heredia García, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2007.

Coneixement i ètica: reflexions sobre filosofia i progrés de la propedèutica mèdica. (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Màrius Petit i Guinovart, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Josep Gil i Ribas, Doctor en Teologia) 2007.

Problemàtica de la família ante el mundo actual. (Discurs d'ingrés de l'acadèmic honorari Excm. Sr. D. Gustavo José Noboa Bejarano, Doctor en Dret i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. D. Paulino Castells Cuixart, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2007.

Alzheimer: Una aproximació als diferents aspectes de la malaltia. (Discurs d'ingrés de l'acadèmica honoraria Excm. Sra. Dra. Nuria Durany Pich, Doctora en Biologia i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. D. Eugenio Oñate, Doctor-Enginyer de Camins, Canals i Ports) 2008.

Guillem de Guimerà, Frare de l'hospital, President de la Generalitat i gran Prior de Catalunya. (Discurs d'ingrés de l'acadèmic honorari Excm. Sr. D. Josep Maria Sans Travé, Doctor en Filosofia i Lletres i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. D. José E. Ruiz Domènec, Doctor en Filosofia Medieval) 2008.

La empresa y el empresario en la historia del pensamiento económico. Hacia un nuevo paradigma en los mercados globalizados del siglo XXI. (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Excm. Sr. D. Guillermo Sánchez Vilaríño, Doctor Ciències Econòmiques i Financeres i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. D. Jaume Gil Aluja, Doctor en Ciències Econòmiques i Financeres) 2008.

Incertesa i bioenginyeria (Sessió Acadèmica dels acadèmics corresponents (Excm. Sr. D. Joaquim Gironella i Coll, Doctor en Medicina i Cirurgia amb el Ponent Excm. Sr. Dr. Jaon Anton Planell Estany, Doctor en Ciències Físiques, Excm. Sr. Dra. Anna M. Gil Lafuente, Doctora en Ciències Econòmiques i Financeres i Il·lm. Sr. D. Humberto Villavicencio Mavrich, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2008.

Modelo de predicción de “Enfermedades” de las Empresas a través de relaciones Fuzzy (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Excm.Sr Antoni Terceño Gómez, Doctor en Ciències Econòmiques i contestació per l'acadèmic de número Excm.Sr.Dr.Paulino Castells Cuixart, Doctor en Medicina) 2009

Células Madre y Medicina Regenerativa (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Excm.Sr.D. Juan Carlos Izpisúa Belmonte, Doctor en Farmàcia i contestació per l'acadèmic de número Excm.Sr.Dr.Joaquim Gironella i Coll, Doctor en Medicina) 2009

Financiación del déficit externo y ajustes macroeconómicos durante la crisis financiera El caso de Rumania (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Excm.Sr.D.Mugur Isarescu Doctor en Ciències Econòmiques i contestació per l'acadèmic de número Excm.Sr.Dr.Alfredo Rocafort Nicolau, Doctor en Ciències Econòmiques) 2009

El legado de Jean Monnet (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excma.Sra.Dra.Teresa Freixas Sanjuán Doctora en Dret i contestació per l'acadèmic de número Excm.Sr.Dr.Fernando Casado Juan, Doctor en Ciències Econòmiques) 2010.

Economía china en la era de la globalización (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Excm.Sr.D.José Daniel Barquero Cabrero Doctor en Ciències Humanes, Socials i Jurídiques i contestació per l'acadèmic de número Excm.Sr.Dr.Alfredo Rocafort Nicolau, Doctor en Ciències Econòmiques) 2010

La Reial Acadèmia, bo i respectant
com a criteri d'autor les opinions
exposades en les seves publicacions,
no se'n fa responsable ni solidària.

© Reial Acadèmia de Doctors
Impressió: Imprenta Baltasar 1861
Tels. 93 346 91 52 - 93 346 92 06
08030 Barcelona
Tiratge 350 exemplars

Dipòsit Legal: B-20.434-2010

REIAL ACADEMIA DE DOCTORS
-Publicacions-