

DUODÉCIMA EDICIÓN

# Manual de RADIOLOGÍA para TÉCNICOS

FÍSICA, BIOLOGÍA Y PROTECCIÓN RADIOLÓGICA



Stewart Carlyle Bushong



Evolve®

Recursos en inglés para estudiantes  
*Código de acceso, en el interior*

# Manual de RADIOLOGÍA para TÉCNICOS

FÍSICA, BIOLOGÍA Y PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

Propiedad de Elsevier  
Prohibida su reproducción y venta

Página deliberadamente en blanco

Propiedad de Elsevier  
Prohibida su reproducción y venta

DUODÉCIMA EDICIÓN

# Manual de RADIOLOGÍA para TÉCNICOS

FÍSICA, BIOLOGÍA Y PROTECCIÓN RADIOLÓGICA



**Stewart Carlyle Bushong**  
ScD, FAAPM, FACR

Professor of Radiologic Science  
Baylor College of Medicine  
Houston, Texas



ELSEVIER



ELSEVIER

Avda. Josep Tarradellas, 20-30, 1.º, 08029, Barcelona, España

*Radiologic Science for Technologists: Physics, Biology, and Protection*, 12th edition  
Copyright © 2021 by Elsevier, Inc. All rights reserved.  
Previous editions copyrighted 2017, 2013, 2008, 2004, 2001, 1997, 1993, 1988, 1984, 1980, and 1975  
ISBN: 978-0-323-66134-8

This translation of *Radiologic Science for Technologists: Physics, Biology, and Protection*, 12th edition by Stewart Carlyle Bushong was undertaken by Elsevier España, S.L.U. and is published by arrangement with Elsevier, Inc.

Esta traducción de *Radiologic Science for Technologists: Physics, Biology, and Protection*, 12th edition, de Stewart Carlyle Bushong, ha sido llevada a cabo por Elsevier España, S.L.U. y se publica con el permiso de Elsevier, Inc.

*Manual de radiología para técnicos. Física, biología y protección radiológica*, 12.ª edición,  
de Stewart Carlyle Bushong  
© 2022 Elsevier España, S.L.U., 2017, 2013, 2010, 2005  
ISBN: 978-84-1382-147-4  
eISBN: 978-84-1382-166-5

Todos los derechos reservados.

#### Reserva de derechos de libros

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra ([www.conlicencia.com](http://www.conlicencia.com); 91 702 19 70/93 272 04 45).

#### Advertencia

Esta traducción ha sido llevada a cabo por Elsevier España, S.L.U. bajo su exclusiva responsabilidad. Los profesionales de la salud y los investigadores deben siempre contrastar con su propia experiencia y sus conocimientos la evaluación y el uso de cualquier información, método, compuesto o experimento descritos en esta obra. Los rápidos avances en el conocimiento científico requieren que los diagnósticos y las dosis de fármacos recomendadas sean siempre verificados de manera independiente. Conforme al alcance máximo permitido por la ley, ni Elsevier, ni los autores, editores o colaboradores asumen responsabilidad alguna por la traducción ni por cualquier reclamación por daños que pudieran ocasionarse a personas o propiedades por el uso de productos o por negligencia, o como consecuencia de la aplicación de cualesquier métodos, productos, instrucciones o ideas contenidos en esta obra. Con el único fin de hacer la lectura más ágil y en ningún caso con una intención discriminatoria, en esta obra se ha podido utilizar el género gramatical masculino como genérico, remitiéndose con él a cualquier género y no solo al masculino.

#### Revisión científica:

**Rosa María Vicente Ramírez**

Doctora en Ciencias de la Salud,

Técnica en Radiología, Hospital Universitario Fundación Alcorcón, Madrid

Servicios editoriales: DRK Edición

Depósito legal: B. 20.119-2021

Impreso en España

# BCM

## Baylor College of Medicine

Cuando escribí la primera edición de este libro, en 1974, no esperaba que nadie lo fuera a leer, ¡y mucho menos a comprar! Lo escribí para lograr un ascenso. Mi director académico me comentó que para llegar a ser profesor titular en el Baylor College of Medicine había que escribir un libro (Bushong, SC. A Book Report. *Radiologic Technology*, 84[4] pp 405-409, March/April 2013).

La mayor recompensa que he obtenido al escribir esta duodécima edición y las once precedentes es la cantidad de amigos que tengo ahora gracias a este libro. Así que os dedico esta edición a vosotros, mis amigos en la enseñanza de la radiología. Muchos han colaborado en la obra directamente y muchos han compartido conmigo palestra en seminarios docentes. Os agradezco vuestra amistad y pido disculpas a los que he dejado fuera porque ¡la edad no perdona y la memoria falla!

Kenneth Abramovitch, University of Texas  
James Adams, Jefferson Community & Technical College  
Nancy Adams, Louisiana State University  
Arlene M. Adler, Indiana University Northwest  
Christian Allard, Universidad de Arica  
Carla Allen, University of Missouri  
Keith Allen, College of DuPage  
Felipe Allende, Universidad Centrale, Chile  
Kelly Angel, Kaiser Permanente  
Richard S. Angulo, Pima Medical Institute,  
Chula Vista, CA  
Sebastian Arancibia, Universidad Centrale, Chile  
Maria Ayers, Health Care Imaging, Australia  
Matt Ayers, Health Care Imaging, Australia  
Alex Backus, Gateway Community College  
Philip Ballinger, Ohio State University  
Stephen Balter, Columbia University  
Ed Barnes, Medical Technology Management Institute  
Gary Barnes, University of Alabama  
Marcy Barnes, Lexington Community College  
Cecilia Munoz Barsbino, University of Peru  
Shirley A. Bartley, Hillyard Technical Center  
Tammy Bauman, Banner Thunderbird Medical Center  
Richard Bayless, University of Montana  
Chris Beaudry, Yakima Valley Community College  
Rochel Becker, Johns Hopkins School of Medical  
Imaging  
Theresa Beland, Kaiser Permanente  
Alberto Bello, Jr., Danville Area Community College  
Bobbie Lynnette Biglane, US Air Force  
Melanie Billmeier, North Central Texas College  
Nathaniel L. Bishop, Jefferson College of Health  
Sciences  
George Bissett, Texas Children's Hospital  
Christy Ebster Bollman, Gurnick Academy of Medical  
Arts  
Christie Bolton, Jefferson State College  
Denise Bowman, Community Hospital of Monterrey  
Peninsula  
Colleen Brady, Minnesota State College  
Jeffrey Brown, Kaiser Permanente  
Karen Brown, Gateway Community College  
Norman L. Burgess, Brookhaven College  
Barry Burns, University of North Carolina  
Cheryl Burtle, Logan University, Chesterfield, MO  
Deanna Butcher, St. Cloud Hospital  
Priscilla Butler, American College of Radiology  
Cisca Bye, Montgomery County Community College  
James Byrne, Houston Community College  
Andres Cabezas Cabrera, Universidad Centrale, Chile  
Robert Cahalan, Iowa SRT  
Donna L. Caldwell, Arkansas State University  
Shaun T. Caldwell, UT MD Anderson Cancer Center  
William J. Callaway, Lincoln Land Community College  
Claudia Calo, Universidad Abierta Interamericana,  
Argentina  
Richard R. Carlton, Arkansas State University  
Mary Ellen Carpenter, Essex County College  
Quinn Carroll, Midland College  
Richard Carson, Oregon Institute of Technology  
Christi Carter, Brookhaven College  
Alejandro Cerda, Clinicas las Condes, Chile  
Tammy Chaffee, Dona Ana Community College  
Timothy C. Chapman, Gateway Community College  
Christian Chavez, Universidad de Arica  
Jean Christensen, Mercy Medical Center

- Valerie Christensen, Association of Educators in Radiologic Science  
 Carolyn L. Cianciosa, Niagara County Community College  
 David Clayton, UT MD Anderson Cancer Center  
 Jennifer Clayton, Linn Benton Community College  
 Brent Colby, Sanford Health School of Radiography, North Dakota  
 Brenda M. Coleman, Columbia State Community College  
 Edgar Colon, Universidad Central del Carribian  
 Judy Cook, Tarrant County College  
 Cathy Cooper, Alabama SRT  
 Charles Coulston, Bluegrass Community & Technical College  
 Annja Cox, Dona Ana Community College  
 Tracy Crandall, Atlanta SRT  
 Russell Crank, Rockingham Memorial Hospital Healthcare  
 Suzanne E. Crandall, Iowa Methodist Medical Center  
 Angela Culliton, Mercy Medical Center  
 Cheryl V. Cunningham, Virginia Western Community College  
 Geoffrey Currie, Charles Sturt University, Australia  
 Jacklynn Scott Darling, Morehead State University  
 Rob Davidson, Canberra University, Australia  
 Lynne Davis, Houston Community College  
 Denise DeGennaro, Lone Star College  
 Jomar DeGuzman, Good Samaritan College, Philippines  
 Ann Delaney, University of Montana  
 Jenny Delawalla, Gwinnett Technical College  
 Tammy Delker, Indian Hills Community College  
 Lois Depouw, Rasmussen College  
 Steve Deutsch, Spencer Hospital  
 Keith Diehl, Santa Rosa Junior College  
 Randall D. Dings, Pima Community College  
 Martha Dollar, Columbus Technical College  
 Sarajane Doty, Kentucky Community and Technical College  
 Mary Doucette, Great Basin College  
 Marsha Dougherty, Lone Star College  
 Eric Douglas, St. Luke's Episcopal Hospital  
 Cheryl DuBose, Arkansas State University  
 Pat Duffy, Roxbury Community College  
 Andrea Guillen Dutton, Chaffey College  
 Ursula Dyer, Kilgore College  
 Hamed Ebrahimnejad, Kerman University, Iran  
 John W. Eichinger, Technical College of the Low Country  
 Karen Emory, Grady Memorial Healthcare  
 Venessa Engelbrecht, Charles Stuart University, Australia  
 Michael A. Enriquez, Merced Community College  
 Rodrigo Espinoza, Universidad Centrale, Chile  
 Lisa S. Fanning, Massachusetts College of Health Sciences  
 Shanna Farish, Medical RT Board of Examiners  
 Terri Fauber, Virginia Commonwealth University  
 Bill Faulkner, University of Tennessee  
 Scott Flamm, Texas Heart Institute  
 Kae Brock Fleming, Columbia State Community College  
 Sherry Floerchinger, Dixie State College of Utah  
 M. Ella Flores, Blinn College  
 Mike Frain, Northern New Mexico College  
 Eugene Frank, Riverland Community College  
 Dawn Fucillo, Washington State University  
 Richard Fucillo, Burlington Community College  
 Michael Fugate, University of Florida  
 Merryl Fulmer, Huntingdon Valley, PA  
 Federico Furtado, Medica Uruguaya y Sanatorio Americano  
 Rodrigo Antonio Galaz, University of Santiago, Chile  
 Marcelo Galvez, Clinica las Condes, Chile  
 Ismael Garcia, Del Mar College  
 Sandra Garcia, Fort Sam Houston  
 Andrew Gardner, Atlanta Technical College  
 Joe Garza, Lone Star College  
 Rudy Garza, Austin Community College  
 Camille Gaudet, Hopital Regional Dr-Georges-L-Dumont  
 Pamela Gebhart-Cline, Riverside School  
 Diane George, Jackson State College  
 Susan Giboney, Kaiser Permanente  
 Tim Gienapp, Apollo College  
 Julia A. Gill, Virginia SRT  
 Lact Giroir, Beaumont Baptist Hospital  
 Yvonne Grant, Iowa SRT  
 Joel Gray, Medical Physics Consulting  
 Mark Greco, Charles Stuart University, Australia  
 Susan Green, Jefferson State Community College, Alabama  
 Ginger Griffin, Jacksonville Community College  
 Olga Grisak, Colorado Mesa University  
 Bob Grossman, Keiser University, Lakeland, FL  
 LaVern Gurley, Shelby State Community College  
 Jennyfer Gutierrez, University of Peru  
 Dick Gwilt, Indian Health Service  
 Jeff Hamzeh, Keiser University  
 Loretta Hanset, Harris County Hospital District  
 Michael D. Harpin, University of South Alabama  
 Nancy Harvey, University of Iowa  
 Kenya Haugen, Baptist Health System  
 Art Haus, Ohio State University  
 Nancy Hawking, University of Arkansas  
 Joyce O. Hawkins, Bon Secours Richmond Health System  
 John Hazle, UT MD Anderson Cancer Center  
 Clyde R. Hembree, University of Tennessee  
 Ed Hendrick, Northwestern University  
 Chad Hensley, University of Nevada-Las Vegas  
 Tracy Herrmann, University of Cincinnati  
 Don Hessel, Research Medical Center, Kansas City, MO  
 Victoria Holas, Arizona Western College  
 Peggy Hoosier, Advanced Health Education Center  
 James Ibviosa, Mercy Hospital  
 Miguel Iglesias, Colegio Tecnologo Medico del Peru  
 Keith Indeck, Norwalk Radiology Center  
 Janie Jackson, Tarrant County College  
 Donald Jacobson, Medical College of Wisconsin

Jeniesha Johnson, Tarrant County College  
Nancy Johnson, Gateway Community College  
Starla Jones, Medical College of Georgia  
Linda Joppe, Rasmussen College  
Helen Schumpert Kauchak, Asheville MRI  
Dianne M. Kawamura, Weber State University  
Leslie E. Kendrick, Boise State University  
Cheryl Kerr, San Diego Naval Station  
April D. Kidd, USFDA/CDRH  
Jeannie Kilgore, Clovis Community College  
Jeffery B. Killian, Midwestern State University  
Kelly Kocis, Boise State University, ID  
Paul A. Kusber, Mills Peninsula School  
Ruth Kusterer, Virginia SRT  
Kent Lambert, Drexel University  
Tim Lambrecht, Baylor Grapevine Diagnostic Imaging  
John P. Lampignano, Gateway Community College  
Traci B. Lang, Virginia SRT  
Dustin Latner, Polk State College  
Paul Laudicina, College of DuPage  
Gary Leach, Memorial Hermann Hospital  
Jonathan Lee, Cape Fear Community College, North Carolina  
Lois Lehman, Texas Scottish Rite Hospital for Children  
Richard Lehrer, Santa Rosa Junior College  
Deborah Leighty, Hillsborough Community College  
Patricia Lenza, Concord's Community College  
Theresa Levitsky, St. Francis Medical Center  
Kurt Loveland, Southern Illinois University  
Michelle Luciano, UNE Puerto Rico  
Peachy S. Luna, Philippine Association of Deans and Faculty of Colleges of Radiologic Technology, Inc.  
Eileen M. Maloney, American Registry of Radiologic Technologists  
Jacob Manning, Keiser University, Lakeland, FL  
Rodrigo Marchant, Central University of Chile  
Victor Ruiz Marquez, University of Peru  
Mark. J. Martone, Massachusetts College of Health Sciences  
Ron Marker, Wheaton Franciscan Healthcare  
Chris B. Martin, Oklahoma Health Sciences Center  
Valerie Martin, Brookhaven College  
Starla Mason, Laramie County Community College  
Allyson Matheaus, Wharton County Junior College  
LeAnn Maupin, Oregon Institute of Technology  
William May, Mississippi State University  
Cynthia McCullough, Mayo Clinic  
Dave McLaren, Polk State College  
Robert Meisch, Indiana State University  
Francisco Mena, Clinicas las Condes, Chile  
Darrly Mendoza, Mills Peninsula School  
Joy Menser, Owensboro Community College  
Kim Metcalf, George Washington University  
Massimo Midiri, University of Palermo  
Becky Miller, Horry-Georgetown Technical College  
Debbie K. Miller, Spokane Community College  
Fabian Monforte, Universidad del Salvador, Argentina  
Ruby Montgomery, Marion County Community College  
Dawn Moore, Atlanta SRT  
Fernando A. Morales, Universidad Diego Portales  
Christopher Morris, Gadsden State Community College, Gadsden AL  
Jose Rafael Moscoso, Universidad Central Del Caribe, Puerto Rico  
C. William Mulkey, Midlands Technical College  
Cecilia Barabino Munoz, Universidad Mayor de San Marcos, Peru  
Mindy Mutschler, Mercy Medical Center  
Glenna Neumann, Atlanta SRT  
Charles Newell, University of South Alabama  
Mary Ellen Newton, St. Francis School  
Edward Nickoloff, Columbia University  
Jon Nissenbaum, Massachusetts Eye and Ear Infirmiry  
Tanya Nolan, Weber State University  
Larry Norris, Lone Star College  
Juan Luis Nunovero, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Peru  
Sandra Ochoa, Del Mar College  
Cyndee Oliver, Lone Star College  
Lori Oswald, Covenant School of Radiography  
Francis Ozor, Lone Star College  
George Pales, University of Nevada  
Paula Pate-Schloder, Misericordia University  
Brenda L. Pfeiffer, Loma Linda University  
Rob Posteraro, Texas Tech University  
Chase Poulsen, Jefferson College of Health Sciences  
Jerilyn J. Powell, Rapid City Regional Hospital  
Valene J.H. Powell, Robert Morris University  
Kevin J. Powers, Virginia SRT  
Perri Preston, University of Florida  
Roger A. Preston, Reid Hospital & Health Services  
Cheryl Pressly, Grady Health School of Imaging Technology  
James Pronovost, Naugatuck Valley Community College  
Barbara Smith Pruner, Portland Community College  
John Radtke, Louisiana State University  
Eytan Raz, University of Rome  
Roland Rhymus, Loma Linda University  
Teresa Rice, Houston Community College  
Jennifer A. Rigsby, Austin Community College  
Ted Roberson, Washoe Medical Center  
Cynthia Robertson, Lone Star College  
Rita Robinson, Memorial Hermann Hospital  
Jeannean Rollins, Arkansas State University  
Veronica Rosales, University Centrale, Chile  
Lil Rossidilla, Pima Medical Institute  
Donna Rufsholm, South Peninsula Hospital  
Bonnie Rush, Educational Enterprise  
Francesca Russo, Santa Marcia Dilicodia  
Loren A. Sachs, Orange Coast College  
Marilyn Sackett, Advanced Health Education Center  
Dorothy Saia, Stamford Hospital  
Ehsan Samei, Duke University  
Beatriz Sanchez, Pontifica Universidad Catolica de Chile  
Thomas Sandridge, University of Illinois  
Natalia dos Santos, Medica Uruguay y Santorio Americano



Jim Sass, Gwinnett Technical College  
 Bette Schans, Colorado Mesa University  
 Lana Scherer, Covenant Health  
 Martin Schotten, Yuma Medical Center  
 Jill Schulz, Covenant Medical Center  
 Euclid Seeram, British Columbia Institute of Technology  
 Victor Seghers, Texas Children's Hospital  
 Kim Seigman, Covenant Health  
 Joseph Shackelford, Jackson Community College  
 Eric J. Shepard, Fort Sam Houston  
 Elizabeth Shields, Presbyterian Hospital  
 Linda Shields, El Paso Community College  
 Anthony Siebert, University of California, Davis  
 Marcelo Zenteno Silva, Central University of Chile  
 Mark A. Sime, Mercy Medical Center  
 Taffi Simone, Riverside Health System  
 Kathryn M. Slagle, University of Alaska-Anchorage  
 Dawn Stark, Mississippi State University  
 Katrina Lynn Steinsultz, Lansing Community College  
 Mike Stewart, Dona Ana Community College  
 Rees Stuteville, Oregon Institute of Technology  
 Donald Summers, Gwinnet Technical College  
 Raquel Tapia, Del Mar College  
 Christl Thompson, El Paso Community College  
 Kyle Thornton, City College of San Francisco  
 Gina Tice, Gadsden State Community College  
 Kimberly Todd, Jackson State Community College  
 Renee Tossell, Pima Community College  
 Brenna Travis, Tarrant County College  
 Alfred Traylor, The Johns Hopkins Hospital  
 Mark Trifunovic, Macquarie Medical Imaging, Australia  
 Shayne Trotter, Health Care Imaging, Australia  
 Pete Tually, Telemed, Australia  
 William Tyler, Savannah Technical Institute  
 Virginia Vanderford, Portland Community College  
 Beth L. Veale, Midwestern State University  
 Michele Patricia Muller Mansur Vieira, Brazil  
 Natalia Viera, Medica Uruguaya y Sanatorio Americano  
 Susan Sprinkle Vincent, Advanced Health Education  
 Center

Donna Vitetta, White Plains College  
 Louis Wagner, University of Texas Medical School  
 Jeff Walmsley, Lorain Community College  
 Steven D. Walters, Regional Medical Center of San Jose  
 Cheryl Dutton Walton, Huntsville Hospital  
 Patti Ward, Colorado Mesa University  
 Lynette K. Watts, Midwestern State University  
 Laurie Weaver, Casper College  
 Stephanie A. Wells, Brookhaven College  
 Diana S. Werderman, Trinity College  
 Amy D. Westbury, Oregon Technical College  
 Mark White, University of Nebraska  
 Tracey B. White, Arkansas State University  
 Erica K. Wight, University of Alaska-Anchorage  
 Raymond Wilenzek, Tulane University  
 Christine Wiley, North Shore Community College  
 Carla Williams, Carteret Community College  
 Judy Williams, Grady Memorial Hospital  
 Charles Willis, UT MD Anderson Cancer Center  
 Bettye G. Wilson, American Registry of Radiologic  
 Technologists  
 Robert Wilson, University of Tennessee  
 Ken Wintch, Colorado Mesa University  
 Leslie F. Winter, Joint Review Committee on  
 Education in Radiologic Technology  
 Ray Winters, Arkansas State University  
 Mary E. Wolfe, Catholic Medical Center  
 Tom Wolfe, Baptist College of Health Sciences, Memphis  
 Andrew Woodward, Wor-Wic Community College  
 Amber Wooten, Arkansas State University  
 Melinda Wren, Del Mar College  
 Donna Lee Wright, Midwestern State University  
 Jennifer Yates, Merritt College  
 Brad York, Houston Community College  
 Suin You, Charles Stuart University, Australia  
 Brian Zawislak, Northwestern University Medical  
 School  
 Marcelo Zentano, Universidad Centrale, Chile  
 Xie Nan Zhu, Guangzhou Medical College  
 Kelly J. Zuniga, Houston Community College

## También dedico este libro a mis amigos, a los actuales y a los que ya no están

Abby Carlyle Kuramoto  
Abigale Rose Spencer  
Ally Carlyle Myers  
Anabella Carlyle Lartique  
Apple Marie Orr  
Arlo Carlyle Hopkinson  
Baily Schroth (†)  
Baily Spaulding  
Bandit Davidson (†)  
Bella Bushong  
Bello Carlyle Jacobson  
Bently Carlyle Conrad  
Biscuit Carlyle Martin  
Boef Kuipers (†)  
Bridget Carlyle Kendrigan  
Brittney Prominski  
Brownie Hindman (†)  
Brutus Payne (†)  
Bucky Carlyle Jacobson  
Buffy Jackson (†)  
Butterscotch Bushong (†)  
Buzz Carlyle Cochran  
Casey Carlyle White  
Casper Miller (†)  
Cassie Kronenberger (†)  
Chandon Davis (†)  
Charley Carlyle Butler  
Charlie Carlyle Bushong  
Charlie Carlyle Lartique  
Chester Chase (†)  
Choco Walker (†)  
Clifford Carlyle Devor  
Coco Winsor  
Cody Carlyle Brady (†)  
Cookie Lake (†)  
Daisey Carlyle Kronenberger  
Daisey Carlyle Smith  
Daisy Carlyle Brady  
Daizy Carlyle Jacobson  
Desi Lohrenz  
Doxie Carlyle Robinson  
Dually Jackson  
Dude Schwartz  
Duke Carlyle McMullin  
Duncan Hindman (†)  
Ebony Bushong (†)  
Emme Carlyle Couch  
Flap Maly  
Fonzie Schroth (†)  
Frank Edlund  
George Carlyle Snodgrass Jacobson  
Geraldine Bushong (†)

Ginger Chase (†)  
Gipper Carlyle Kendrigan  
Grayton Friedlander  
Gretchen Scharlach (†)  
Griffin Carlyle Conrad  
Guadalupe Tortilla Holmberg  
Gus Carlyle Robinson  
Hedgington Bova MacFarlane Esq.  
Heidi Carlyle Couch  
Huckleberry (Huck) Carlyle Elliott  
Hugo MutzvCheyneWalk Morris  
Jemimah Bushong (†)  
Jenn Sheba Jacobson  
Jessie Carlyle Jacobson  
Jessie Jackson Jacobson  
Jody Carlyle Rogers  
Kalli Carlyle Fields  
Kate Davidson (†)  
Katie Carlyle Fields  
Katie Carlyle Robinson  
Kermit Carlyle Chase  
Kokopelli Carlyle Hames  
Latte Carlyle Stewart  
Leo Carlyle Sanders  
Linus Black (†)  
Lizzie Carlyle Bryan  
Lizzy Prominski  
Loftus Meadows  
Louie Carlyle Edlund  
Lucky Carlyle Craig  
Lucy Spaulding (†)  
Luna Carlyle Cochran  
Maddie Bushong  
Marley Carlyle Sanders  
Marlo Carlyle Racke  
Max Velcro Dykes  
Maxwell Carlyle McMullin  
Maxwell Haus (†) and my lenses  
Midnight Lunsford (†)  
Mimi Hana (Indian Princess)  
Mocha Carlyle Stewart  
Molly Carlyle Jacobson  
Molly Holmberg (†)  
Mrs. Jones Carlyle Bush  
Murphy Carlyle Sanders  
Muttly Chase (†)  
Nugget Carlyle Devor  
Old Dog Walker  
Pancho Villa Holmberg (†)  
Peanut Schroth (†)  
Penny Carlyle Friedlander  
Pepper Carlyle Miller

Percy Lohrenz  
Petra Chase (†)  
Powers Jackson  
Prissy Carlyle Myers  
Queenie Carlyle Reed  
Rita Carlyle Kronenberger  
Sadie Bell Brady  
Sadie Carlyle Burdick  
Sadie Carlyle Reed  
Sage Carlyle Foye  
Sammie Chase  
Sapphire Miller (†)  
Scotty Leigh Strax  
Sebastian Miller (†)  
Sedona Carlyle Dennis  
Sheba Carlyle Jacobson  
Skyla Carlyle Schroth  
Sophe Carlyle Archer  
Susi Bueso  
Taco Carlyle Mashek  
Tater Tot Castleberry  
Teddy Carlyle Ellis  
Teddy Schroth (†)  
Tessa Carlyle Robinson  
Thelma Carlyle Edlund  
Theodore Carlyle Watson  
Tigger Carlyle Brice  
Tiggy Carlyle Plant (†)  
Toby Schroth (†)  
Toto Walker (†)  
Travis Chase (†)  
Tuffy Beman  
Woody Carlyle Hindman  
Zoe Carlyle Craft

(†) D. E. P.



Teddy Carlyle Ellis preparándose para el examen del American Registry of Radiologic Technologists (ARRT).

## Dedicatoria a Kraig Emmert



Si ha leído «A Book Report» (*Radio-logic Technology*, 84[4], pp 405-409, March/April 2013), entenderá por qué se publicó la primera edición de este libro de texto en 1975: ¡promoción académica! En aquella época, en el Baylor College of Medicine, uno de los requisitos para ascender a un puesto de profesor titular era ser autor de un libro. Esa primera

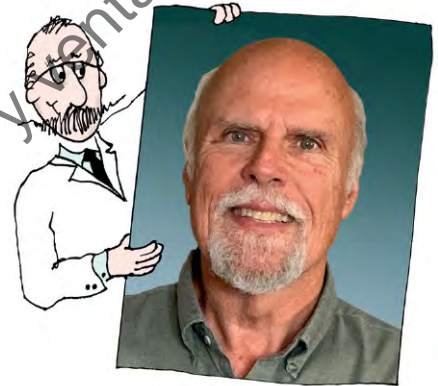
edición era pésima, pero conseguí mi ascenso.

A partir de la segunda edición, en 1980, el reconocimiento, las ventas y, sobre todo, la acogida por parte de docentes y estudiantes aumentaron de forma excepcional. ¿Por qué? ¡No por la claridad de la escritura de la física, ni por el nivel de la física, ni por la adecuada selección de los temas de física!

No. A partir de la segunda edición, mi amigo, compañero y artista Kraig Emmert comenzó a ilustrar este libro de texto con una caricatura ¡MÍA! Y no era solo la caricatura, sino el humor asociado a todas las ilustraciones.

Aquí estamos, cuarenta años más tarde y diez años después de la jubilación de Kraig, y le estoy muy agradecido por su trabajo y, lo que es más importante, por su amistad y su papel como maestro en el arte de dar. Kraig llegó al Baylor College of Medicine como artista en 1973. Nos hicimos amigos al instante cuando me ayudó con las ilustraciones de los primeros artículos científicos.

Kraig me enseñó el arte y el placer de dar. Mientras trabajaba, participaba de una forma muy activa en varias organizaciones benéficas de la comunidad. Una vez jubilado, se ha convertido en uno de los principales responsables del distrito suroeste de la American Red Cross. Ofrece su tiempo y su talento generosamente, y es una inspiración para muchos, incluido yo.



Propiedad de Elsevier  
Prohibida su reproducción y venta

# Prólogo

## OBJETIVO Y CONTENIDO

El objetivo de *Manual de radiología para técnicos. Física, biología y protección radiológica* es triple: transmitir conocimientos básicos de física radiológica, preparar a los estudiantes para el examen de certificación del ARRT (American Registry of Radiologic Technologists) y proporcionar una base de conocimientos para que los radiólogos en ejercicio puedan tomar decisiones documentadas sobre factores técnicos, calidad de la imagen diagnóstica y control de la radiación para los pacientes y el personal.

En este manual se ofrece una amplia explicación de la radiología, incluidas las bases de la física radiológica, las técnicas de imagen diagnósticas, la radiobiología y el tratamiento de la radiación, estudiando específicamente temas como la mamografía, la radioscopia, los procedimientos intervencionistas, la tomografía computarizada helicoidal multicorte, la tomosíntesis y los diversos modos de imagen digital.

Las bases de la radiología no pueden separarse de las matemáticas, pero este manual no da por hecho que los lectores tengan una base matemática. Las pocas ecuaciones matemáticas presentadas van siempre seguidas de ejemplos de problemas, con una aplicación clínica directa. Como ayuda adicional para el aprendizaje, todas las fórmulas matemáticas se resaltan con su propio icono:



Además, las ideas más importantes se presentan con el icono de un pingüino:



Esta duodécima edición mejora estos populares cuadros de información al incluir aún más conceptos clave y definiciones en cada capítulo. También se incluyen objetivos de aprendizaje y resúmenes de los capítulos para ayudar a los estudiantes y facilitar la lectura del texto.

## PERSPECTIVA HISTÓRICA

Durante las décadas posteriores al descubrimiento de los rayos X por Roentgen en 1895, la radiología diagnóstica fue un campo de estudio y práctica relativamente estable.

Los cambios realmente importantes de esa época pueden contarse con los dedos de una mano: el tubo de Crookes, la rejilla radiológica, las pantallas de intensificación radiológica y la intensificación de imágenes.

Sin embargo, desde la publicación de la primera edición del manual, en 1975, se han implementado en la práctica diaria habitual sistemas más novedosos de diagnóstico por imagen: tomografía computarizada helicoidal multicorte, radiografía computarizada, tomosíntesis, radiografía digital y radioscopia digital. Estas innovaciones han sido posibles por los avances realmente espectaculares en tecnología informática y en receptores de imágenes.

## NOVEDADES DE ESTA EDICIÓN

La radiología digital ha sustituido a la radiografía convencional en placa y esto requiere que, además de los conocimientos que ya necesitaban con anterioridad, los técnicos en radiología adquieran otros nuevos y diferentes, y en el mismo tiempo de formación. Se han reorganizado, consolidado y actualizado los capítulos de esta edición para reflejar el entorno actual de la imagen médica. Esta actualización incluye descripciones de temas que prometen una increíble aceleración de la imagen médica: tomosíntesis, inteligencia artificial, computación cuántica (qubits) y cambios en el tratamiento de la radiación. La expansión del universo se está acelerando, igual que la expansión de la radiología.

La preparación del texto de esta duodécima edición ha sido para mí una experiencia muy formativa. Sé que la finalidad de redactar este libro es ayudar al estudiante a comprender este difícil tema de la física y su aplicación a la imagen médica. Cuando puse en duda la utilidad de un resumen al final de cada capítulo, se me ofrecieron muchos motivos para no abandonarlo. El motivo más convincente para que se mantenga es que los lectores vayan al final de cada capítulo primero y lean el resumen. Esto les ofrecerá una visión rápida y una revisión del contenido de los capítulos.

## NOTA SOBRE EL TEXTO

En esta duodécima edición se utiliza el Sistema Internacional de Unidades, que incluye las unidades de radiación y radiactividad. El roentgen y el rad se sustituyen por el gray ( $Gy_a$  y  $Gy_t$ , respectivamente), y el rem, por el sievert (Sv). Puede encontrarse un resumen de cantidades y unidades útiles en radiología en las últimas páginas del libro.

La exposición a las radiaciones se mide en  $C/kg$ , y se expresa en la unidad radiológica especial de  $mGy$ . Debido a que el  $mGy$  también es una unidad de dosis de radiación, la medición de exposición a las radiaciones se diferencia de la dosis histórica añadiendo un subíndice  $a$  o  $t$  a  $mGy$ .

## AGRADECIMIENTOS

Para la preparación de la duodécima edición, estoy en deuda con los numerosos lectores de las ediciones anteriores que enviaron sugerencias, críticas, correcciones y cumplidos.

Estoy especialmente agradecido a los muchos profesores de Radiología a los que he mencionado en las dedicatorias de esta duodécima edición. Sus propuestas de cambios y aclaraciones siempre demostraron ser un gran acierto. Muchos aportaron ilustraciones y se ha añadido el correspondiente agradecimiento en ellas.

Mi amigo y compañero Ben Archer es autor del “Cuento del pingüino”, que se ha convertido en una herramienta de enseñanza especialmente eficaz. Ello se ha traducido en las viñetas de pingüinos, sugeridas por docentes y estudiantes, que entran a formar parte de mis clases de forma habitual. Nunca olvidaré la primera. Tres estudiantes de Ruby Montgomery me interrumpieron durante la Judy William’s Atlanta SRT Student and Educators’ Conference de 2002. Me preguntaron: «¿Los osos polares comen pingüinos?». «Por supuesto. Son carnívoros», contesté. «¡No!, los osos polares viven en el Polo Norte, y los pingüinos, en el Polo Sur», y una sonora carcajada inundó la sala.

Las viñetas de los pingüinos y muchas otras ilustraciones que aparecen en el libro son obra de otro gran amigo y compañero, Kraig Emmert. Gracias, Kraig, por tu enorme esfuerzo y por tu tiempo.

Cuando el estudiante o el profesor utilicen este manual y se les planteen preguntas o comentarios, espero que me los envíen por correo electrónico a [sbushong@bcm.edu](mailto:sbushong@bcm.edu) para que entre todos podamos facilitar el aprendizaje de esta difícil materia. Puede que no responda inmediatamente, pero prometo que lo haré.

«La física es divertida» es el lema de mis cursos de radiología. «La física es buena para ti» es la pegatina que tengo en el parachoques. Envíame un correo electrónico si quieres una.



Stewart Carlyle Bushong

# Índice de capítulos

## PARTE I

### FÍSICA RADIOLÓGICA, 1

- 1 Conceptos esenciales de radiología, 2
- 2 Fundamentos de física, 18
- 3 Estructura de la materia, 34
- 4 Energía electromagnética, 53
- 5 Electricidad, magnetismo y electromagnetismo, 69

## PARTE II

### RADIACIÓN, 91

- 6 El sistema de imagen por rayos X, 92
- 7 El tubo de rayos X, 111
- 8 Producción de rayos X, 129
- 9 Emisión de rayos X, 142
- 10 Interacción de los rayos X con la materia, 152

## PARTE III

### EL DIAGNÓSTICO POR IMAGEN, 167

- 11 La ciencia del diagnóstico por imagen, 168
- 12 Radiografía computarizada, 187
- 13 Radiografía digital, 199
- 14 Técnica radiográfica digital, 206
- 15 Adquisición de las imágenes, 218
- 16 Optimización del paciente-imagen, 228

## PARTE IV

### REPRESENTACIÓN DE LA IMAGEN MÉDICA, 233

- 17 Visualización de la imagen médica, 234
- 18 Sistema de archivo y comunicación de imágenes, 244

## PARTE V

### CALIDAD DE LA IMAGEN MÉDICA, 253

- 19 Percepción de las imágenes, 254
- 20 Monitor digital, 263
- 21 Descriptores de las imágenes médicas, 272
- 22 Radiación dispersa, 286
- 23 Artefactos radiográficos, 306

## PARTE VI

### IMÁGENES MÉDICAS AVANZADAS, 317

- 24 Mamografía, 318
- 25 Radioscopia o fluoroscopia, 332
- 26 Radiología intervencionista, 346
- 27 Tomografía computarizada, 363
- 28 Tomosíntesis, 389

## PARTE VII

### RADIOBIOLOGÍA, 401

- 29 Biología humana, 402
- 30 Principios fundamentales de radiobiología, 414
- 31 Radiobiología molecular, 422
- 32 Radiobiología celular, 429
- 33 Efectos deterministas de la radiación, 439
- 34 Efectos estocásticos de la radiación, 454

## PARTE VIII

### PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, 473

- 35 Física médica, 474
- 36 Diseño para la protección radiológica, 484
- 37 Dosis de radiación del paciente en radiografía/radioscopia, 501
- 38 Dosis de radiación al paciente en tomografía computarizada, 511
- 39 Control de la dosis de radiación en el paciente, 521
- 40 Control de la dosis de radiación profesional, 533

Glosario, 550

Índice alfabético, 571

Revisión de física básica

Unidades útiles en radiología

Tablas de conversión

Página deliberadamente en blanco

Propiedad de Elsevier  
Prohibida su reproducción y venta



PARTE



# FÍSICA RADIOLÓGICA

Propiedad de Elsevier  
Prohibida su reproducción y venta



# Conceptos esenciales de radiología

## OBJETIVOS

---

Al terminar este capítulo, el lector debe ser capaz de realizar lo siguiente:

1. Describir las características de la materia y la energía.
2. Identificar las diferentes formas de energía.
3. Definir la radiación electromagnética y la radiación ionizante.
4. Exponer la intensidad relativa de distintas fuentes de radiación ionizante.
5. Enumerar los conceptos básicos de la protección radiológica.
6. Explicar el origen de los sistemas científicos de medida.
7. Enumerar y definir las unidades de radiación y de radiactividad.

## ÍNDICE DE CAPÍTULO

---

Naturaleza de nuestro entorno

Materia y energía

Fuentes de radiación ionizante

Descubrimiento de los rayos X

Desarrollo de las técnicas  
de imagen médicas

Registro de lesiones por radiación

Protección básica de la radiación

Ropa de protección

Protección gonadal

Barreras protectoras

Filtración

Colimación

**Terminología radiológica**

Prefijos numéricos

Unidades radiológicas

**Equipo médico de diagnóstico  
por imagen**

**E**STE CAPÍTULO explora los conceptos básicos de la ciencia y la tecnología de la imagen por rayos X. Esto incluye el estudio de la materia, la energía, el espectro electromagnético y la radiación ionizante. La producción y el empleo de la radiación ionizante como instrumento diagnóstico definen las bases de la radiología. Los técnicos que tratan específicamente con la imagen por rayos X son los técnicos en radiología. Estos profesionales tienen una gran responsabilidad en la realización de exámenes radiológicos de acuerdo con las normas de radioprotección establecidas para la seguridad de los pacientes y del personal médico.

En el instante en que un tubo de rayos X produce radiación X, todas las leyes de la física se hacen evidentes. El electrón proyectado desde el cátodo incide en la diana del ánodo y se producen rayos X. Algunos de estos rayos X interaccionan con tejidos y otros con el receptor de imagen (RI), para formar una imagen. La física de la radiología trata de la producción y la interacción de los rayos X.

La radiología es una opción profesional con grandes oportunidades en diversos campos. Bienvenidos al campo de la imagen médica.

## NATURALEZA DE NUESTRO ENTORNO

En un análisis físico, todas las cosas de nuestro entorno pueden clasificarse como materia o energía. La materia es todo aquello que ocupa un espacio y tiene masa. Es decir, la sustancia material de la que están compuestos los objetos físicos. Toda materia está formada por bloques de construcción fundamentales llamados **átomos** que están dispuestos en varios estados complejos. Estas disposiciones atómicas se consideran en mayor profundidad en el **capítulo 3**.

Una característica distintiva principal de la materia es la **masa**, la cantidad de materia contenida en cualquier objeto físico. Generalmente utilizamos el término **peso** para describir la masa de un objeto, y para nuestros objetivos podemos considerar masa y peso como magnitudes equivalentes. Sin embargo, conviene recordar que, en un sentido estricto, estos conceptos no son el mismo concepto. En realidad, la masa se describe por su equivalencia energética, mientras que el peso es la fuerza ejercida sobre un cuerpo bajo la influencia de la gravedad.

La masa se mide en kilogramos (kg). Por ejemplo, en la Tierra un hombre de 90 kg pesa más que una mujer de 55 kg. Esto ocurre debido a la mutua atracción, denominada **gravedad**, entre la masa de la Tierra y la masa del hombre o la mujer. En la Luna, el hombre y la mujer pesarían solo alrededor de una sexta parte de lo que pesan en la Tierra, ya que la masa de la Luna es mucho menor que la de la Tierra. Sin embargo, la masa del hombre y de la mujer permanece invariable y sigue siendo de 90 y 55 kg, respectivamente.



La masa es la cantidad de materia descrita por su equivalencia en energía.

## MATERIA Y ENERGÍA

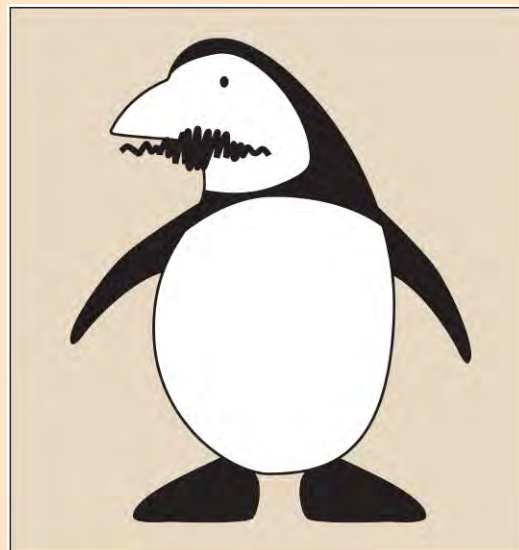
La **materia** es todo aquello que ocupa un espacio. Es la sustancia material con masa de la que están compuestos los objetos físicos. Los bloques de construcción complejos fundamentales de la materia son los **átomos** y las **moléculas**. El kilogramo es la unidad de masa del Sistema Internacional (SI) y no está relacionado con los efectos gravitatorios. El prefijo **kilo** multiplica por 1.000 la unidad fundamental; un kilogramo (kg) es igual a 1.000 gramos (g).



### EL CUENTO DEL PINGÜINO, POR BENJAMIN RIPLEY ARCHER

En la vasta extensión de la región antártica hubo una vez un iceberg grande, hermoso y aislado que flotaba en un mar tranquilo. Debido a su localización y facilidad de acceso, el gran iceberg llegó a ser el lugar predilecto de los pingüinos de toda la zona. Cada vez más pingüinos llegaron a su nuevo hogar y comenzaron a cubrir las laderas de la montaña de hielo; entonces, el iceberg empezó a hundirse en el océano. Los pingüinos de abajo empezaron a escalar y forzaron a otros a abandonar el iceberg y a lanzarse de nuevo al mar. Pronto el iceberg entero quedó casi sumergido por el peso del ingente número de pingüinos que intentaban instalarse en él.

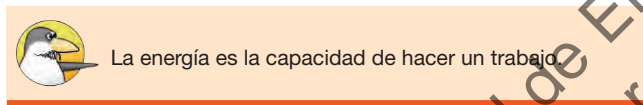
**Moraleja:** El **PINGÜINO** representa un hecho importante o un fragmento de información que precisamos para entender una cuestión determinada. El cerebro, como el iceberg, es capaz de retener solo una parte de la información antes de verse desbordado. Cuando esto ocurre, los conceptos abandonan el cerebro como los pingüinos el iceberg que se hunde. Así pues, el secreto para aprender consiste en reservar espacio para que los «pingüinos» auténticos rellenen los confines valiosos, pero limitados, de nuestros cerebros. Por ello, los puntos principales de este libro están destacados y marcados como «**PINGÜINOS**».



Aunque la masa (la cantidad de materia) permanece invariable con independencia de su estado, puede cambiar de tamaño, estado y forma. Por ejemplo, un bloque de hielo de 1 kg modifica su estado cuando se derrite, para convertirse en un charco de agua. Si el charco se deja secar, el agua aparentemente desaparece por completo. Sin embargo, sabemos que el hielo se ha transformado de un estado sólido a un estado líquido y que el agua líquida se ha convertido en vapor de agua suspendido en el aire. Si tomamos todas las moléculas que componen el hielo, el agua líquida y el vapor de agua y medimos sus masas, observaremos que en todas sus formas el agua tiene la misma masa.

Como la materia, la energía puede existir en diferentes formas. En el SI de unidades, la energía se mide en julios (J). En radiología se usa con frecuencia la unidad electronvoltio (eV).

La **energía potencial** es la capacidad de realizar un trabajo en función de la posición. La hoja de una guillotina sujeta en lo alto por un sistema de cuerda y polea, ofrece un ejemplo de un objeto que posee energía potencial (fig. 1.1). Si se corta la cuerda, la hoja descenderá y cumplirá con su espantosa tarea. Es preciso realizar un trabajo para llevar la hoja de la guillotina hasta su posición elevada y, por este motivo, se dice que la hoja tiene una determinada energía potencial. Otros ejemplos de objetos que poseen energía potencial incluyen una montaña rusa en lo alto de la pendiente y el muelle extendido de una puerta abierta.

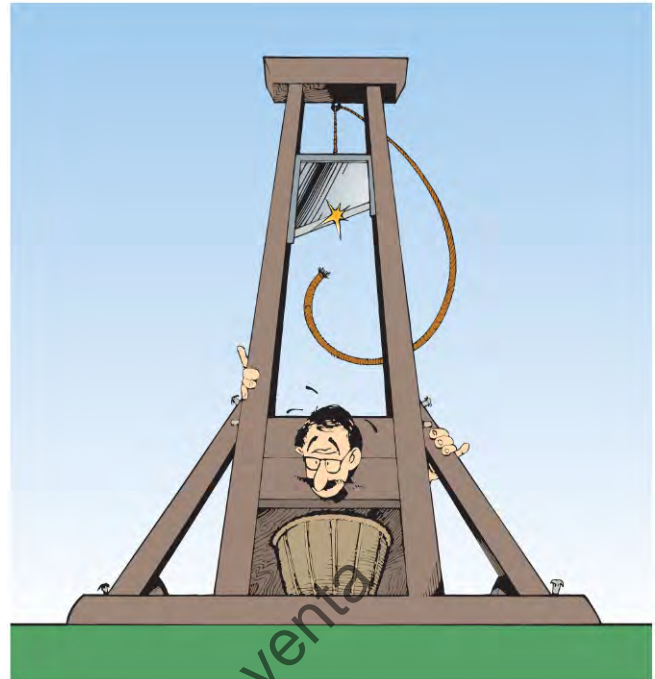


La **energía cinética** es la energía del movimiento. Toda la materia en movimiento posee energía cinética: un automóvil moviéndose, un molino de viento girando, una hoja de guillotina cayendo. Estos sistemas pueden realizar un trabajo debido a su movimiento.

La **energía química** es la energía liberada por una reacción química. Un ejemplo notable de este tipo de energía es el que se proporciona a nuestros cuerpos mediante reacciones químicas que actúan sobre los alimentos que comemos. En el nivel molecular, este campo de la ciencia se denomina **bioquímica**. La energía que se libera al explotar la dinamita es un ejemplo espectacular de energía química.

La **energía eléctrica** representa el trabajo que puede realizarse cuando un electrón se mueve a través de una diferencia de potencial eléctrico (voltaje). La forma más familiar de energía eléctrica es la electricidad doméstica normal, que conlleva el movimiento de electrones a través de un hilo de cobre impulsado por una diferencia de potencial eléctrico de 220 voltios (V). Todos los aparatos eléctricos, como los motores, calentadores y ventiladores, funcionan mediante el uso de energía eléctrica.

La **energía térmica (calor)** es la energía del movimiento en el nivel atómico y molecular. Es la energía cinética de las moléculas y está estrechamente relacionada con la temperatura. Cuanto más rápido vibran las moléculas



**FIGURA 1.1** La hoja de la guillotina ofrece un ejemplo dramático tanto de energía potencial como cinética. Cuando la hoja está situada en su máxima altura e inmóvil en su lugar, tiene energía potencial. Cuando la hoja se deja caer, la energía potencial es liberada como energía cinética.

de una sustancia, mayor energía térmica contiene la sustancia y mayor es su temperatura.

La **energía nuclear** es la energía contenida en el núcleo de un átomo. Podemos controlar la liberación y la utilización de este tipo de energía en centrales nucleares de energía eléctrica. Un ejemplo de liberación no controlada de energía nuclear es la bomba atómica.

La **energía electromagnética** es quizá la forma menos familiar de energía. Sin embargo, es la más importante para nuestro objetivo, ya que es el tipo de energía que se utiliza en la obtención de imágenes por rayos X. La energía que viaja por el espacio es una combinación de campos eléctricos y magnéticos. Además de los rayos X y rayos gamma, la energía electromagnética incluye las ondas de radio, las microondas y la luz ultravioleta, infrarroja y visible. No incluye ni el sonido ni los ultrasonidos.

Así como la materia puede transformarse de un tamaño, estado y forma a otros, también la energía puede convertirse de un tipo a otro. Por ejemplo, en radiología la energía eléctrica en un sistema de imagen de rayos X se utiliza para producir energía electromagnética (el rayo X), que se convierte en una señal eléctrica en un RI digital.

Reflexione ahora sobre la afirmación de que todo puede clasificarse como materia o energía. Mire a su alrededor, fijese en cualquier cosa y comprobará que siempre se cumple. Debería ser capaz de clasificar cualquier objeto o entidad como materia, energía o ambas. Con frecuencia, materia y energía se manifiestan juntas: un automóvil en movimiento tiene masa y energía cinética, el agua hirviendo posee masa y energía térmica, la torre inclinada de Pisa tiene masa y energía potencial.

Quizá la propiedad más extraña asociada con la materia y la energía es que son intercambiables, una característica descrita por primera vez por Albert Einstein en su conocida teoría de la relatividad. La ecuación de **equivalencia masa-energía** de Einstein es una piedra angular de esta teoría.

Esta equivalencia masa-energía es la base de la bomba atómica, las centrales de energía nuclear y ciertas modalidades de imagen de medicina nuclear.

### MASA-ENERGÍA



$$E = mc^2$$

donde  $E$  es la energía,  $m$  es la masa y  $c$  es la velocidad de la radiación electromagnética (luz) en el vacío.

La energía emitida y transferida en el espacio se denomina **radiación**. Cuando la cuerda de un piano vibra se dice que irradia sonido; el sonido es una forma de radiación. Desde el punto en que cae una piedra en un estanque tranquilo se forman ondas. La luz visible, una forma de energía electromagnética, es irradiada por el sol y se denomina **radiación electromagnética**. La energía electromagnética suele denominarse radiación electromagnética o simplemente **radiación**.

La materia que intercepta la radiación y absorbe parte o la totalidad de esta se denomina **expuesta** o **irradiada**. Un día en la playa le expone a la radiación ultravioleta. La luz ultravioleta es el tipo de radiación que causa las quemaduras solares. Durante una exploración radiológica el paciente está expuesto a los rayos X. Se dice que el paciente está irradiado.

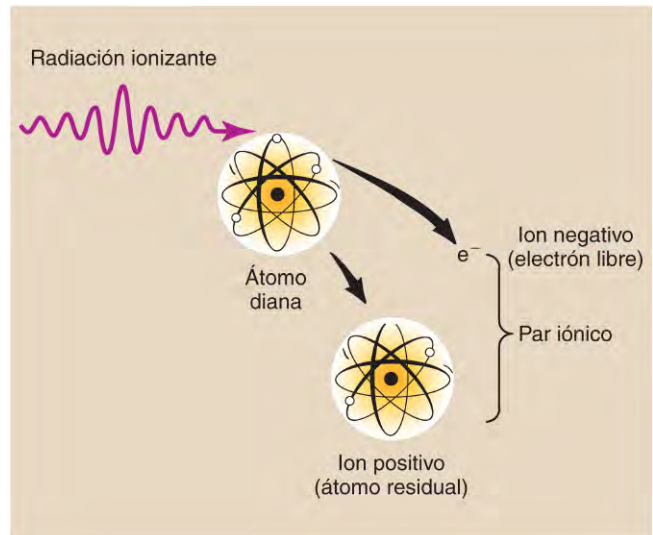


La radiación es la transferencia de energía.

La **radiación ionizante** es un tipo especial de radiación que incluye los rayos X. Radiación ionizante es cualquier tipo de radiación capaz de retirar un electrón orbital del átomo con el que interacciona (fig. 1.2). Este tipo de interacción entre la radiación y la materia se denomina **ionización**. La ionización tiene lugar cuando los rayos X pasan cerca de un electrón orbital de un átomo, al que proporcionan suficiente energía para que dicho electrón abandone el átomo. La radiación ionizante puede interaccionar con átomos adicionales e ionizarlos. El electrón orbital y el átomo del cual se separa reciben el nombre de **par iónico**. El electrón es un ion negativo y el átomo residual un ion positivo.



La ionización es la extracción de un electrón de un átomo.



**FIGURA 1.2** La ionización es la extracción de un electrón de un átomo. El electrón extraído y el átomo resultante cargado positivamente se denominan **par iónico**.

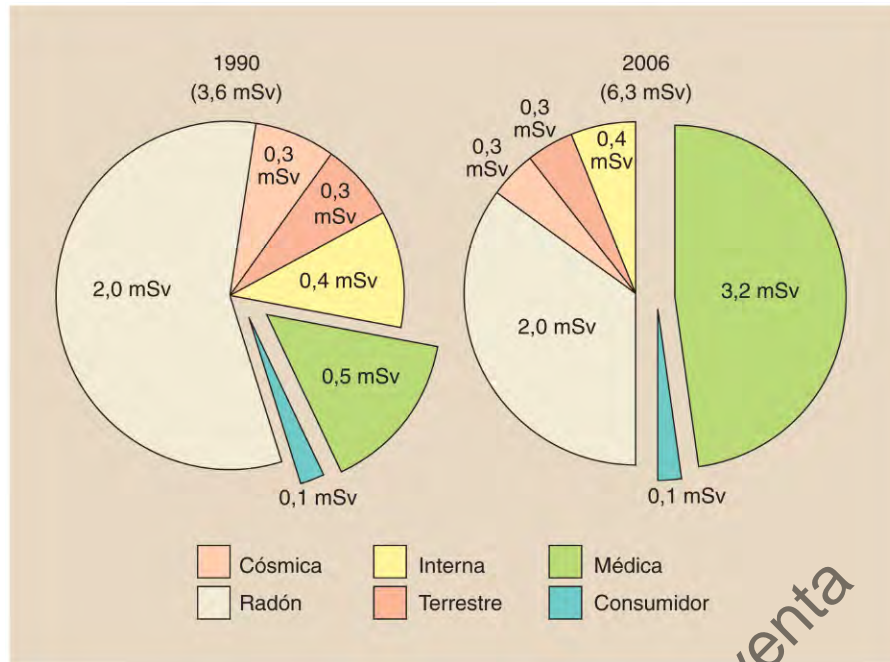
Por tanto, cualquier tipo de energía capaz de ionizar la materia se conoce como radiación ionizante. Los rayos X, los rayos gamma y la luz ultravioleta son las únicas formas de radiación electromagnética con suficiente energía para ionizar. Algunas partículas de movimiento rápido (partículas con elevada energía cinética) también son capaces de producir ionización. Algunos ejemplos de radiación ionizante de partículas son las partículas alfa y beta (v. cap. 3). Aunque las partículas alfa y beta se llaman a veces **rayos**, esta denominación es incorrecta.

### FUENTES DE RADIACIÓN IONIZANTE

Numerosos tipos de radiación son inofensivos, pero las radiaciones ionizantes pueden provocar lesiones en los seres humanos. Estamos expuestos a muchas fuentes de radiación ionizante (fig. 1.3). Estas fuentes se pueden dividir en dos categorías principales: **radiación ambiental natural** y **radiación producida por el hombre**.

La radiación natural produce una dosis anual de aproximadamente 3 mSv (milisieverts). La radiación producida por el ser humano origina aproximadamente 3,1 mSv al año. El mSv es la unidad de dosis equivalente. Se utiliza para expresar la exposición a la radiación de la población y el riesgo que implica en dichas poblaciones.

En la radiación ambiental natural se distinguen cuatro componentes: **rayos cósmicos**, **radiación terrestre**, **radionúclidos depositados en el interior del organismo humano** y **radón**. Los rayos cósmicos son radiaciones electromagnéticas y de partículas emitidas por el Sol y las estrellas. En la Tierra, la intensidad de la radiación cósmica aumenta con la altitud y la latitud. La radiación terrestre proviene de depósitos de uranio, torio y otros radionúclidos terrestres. La intensidad depende en alto grado de la geología local. Los radionúclidos depositados en el interior del cuerpo humano, sobre todo el  $^{40}\text{K}$  (potasio 40), son metabolitos naturales. Siempre han



**FIGURA 1.3** Contribución de varias fuentes al porcentaje de la dosis de radiación media de la población de EE. UU., 1990 y 2006. Retomaremos este importante gráfico de sectores en el capítulo 39.

estado con nosotros y contribuyen a suministrar a cada persona una dosis igualada.

La mayor fuente de radiación ambiental natural es el radón. Se trata de un gas radiactivo producido por la degradación natural del uranio, que está presente en la Tierra en forma de trazas. Los materiales de construcción, como el hormigón, el ladrillo o el yeso de enlucir, contienen radón. Este gas emite partículas alfa que no son penetrantes, y por ello contribuyen a dosis de radiación solo en el pulmón.

En conjunto, estas fuentes de radiación ambiental natural producen aproximadamente  $300 \times 1.000 \mu\text{Sv/h}$  a nivel de la cintura en EE. UU. (fig. 1.4). Esta cantidad equivale a una dosis de exposición anual de aproximadamente  $0,2 \text{ mSv/año}$  a lo largo de la costa del golfo de México y Florida hasta  $1 \text{ mSv/año}$  o dosis mayores en la región de las Montañas Rocosas.

Sin embargo, debe recordarse que los seres humanos han coexistido durante cientos de miles de años con este nivel de radiación ambiental natural. Sin duda, esta radiación ambiental natural ha influido en la irradiación humana. Algunos genetistas afirman incluso que en la evolución la radiación ionizante interviene como un factor principal. Si fuera así, tendríamos que estar realmente interesados en el control de la exposición a radiación innecesaria, dado que, en el último siglo, con las aplicaciones crecientes de tipo médico de la radiación, la exposición anual media de la población a la radiación ha aumentado significativamente.

Los rayos X diagnósticos constituyen la mayor fuente de origen humano de radiación ionizante ( $3,0 \text{ mSv/año}$ ). Esta estimación fue realizada en 2006 por el National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Estimaciones anteriores del NCRP en 1990

situaban esta fuente en casi  $0,4 \text{ mSv/año}$ . El incremento producido durante este periodo de 16 años puede atribuirse principalmente al uso creciente de la tomografía computarizada (TC) y a la fluoroscopia de alto nivel.

Los beneficios de la aplicación de los rayos X en medicina son indiscutibles; sin embargo, estas aplicaciones deberían realizarse con prudencia y con todas las medidas dirigidas a reducir la exposición innecesaria de los pacientes y el personal. Esta responsabilidad recae principalmente en el técnico en radiología, dado que es él quien normalmente controla el sistema de imagen con rayos X, durante las exploraciones radiológicas.

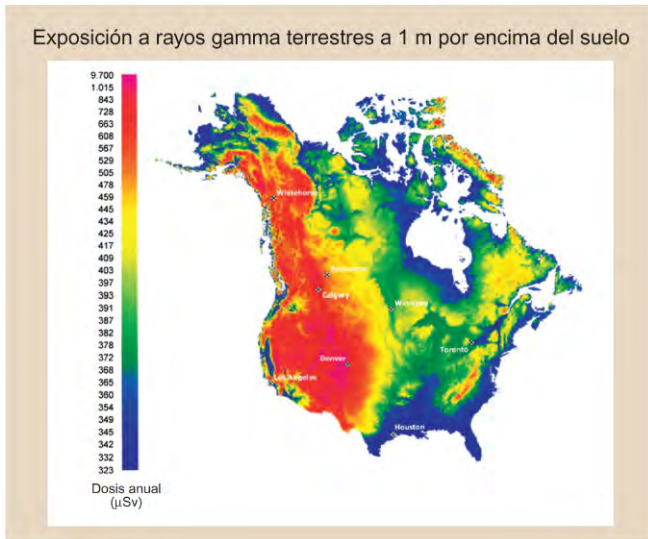
La dosis anual aproximada aceptada actualmente resultante de las aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes es de  $3,0 \text{ mSv}$ . A diferencia de la dosis de radiación ambiental natural, este nivel tiene en cuenta tanto a las personas que no se hacen ninguna radiografía como a las que necesitan más de una radiografía al año.

La exposición a radiación médica de una parte de la población será cero, pero para otras personas será bastante alta. Este nivel medio es comparable con los niveles de radiación ambiental natural y, en consecuencia, uno podría preguntarse por qué es necesario interesarse en el control de la radiación y la seguridad en las imágenes médicas.

**Pregunta:** ¿Qué porcentaje de la dosis de radiación media anual se debe a las imágenes médicas?

**Respuesta:**  $3,0 \text{ mSv} / 6,2 \text{ mSv} = 0,484 = 48\%$

Otras fuentes de radiación de origen humano incluyen la producción de energía nuclear, las aplicaciones de investigación, las fuentes industriales y los productos



**FIGURA 1.4** Exposición a la altura del cinturón de EE. UU. (Cortesía del U.S. Geological Survey.)

de consumo. Las centrales de energía nuclear y otras instalaciones industriales contribuyen muy poco a nuestra dosis de radiación. Los productos de consumo como algunas esferas de reloj, las señales de salida, los detectores de humo, las lámparas de camping y los sistemas de señalización de los aeropuertos aportan 0,1 mSv a nuestra dosis de radiación anual.

## DESCUBRIMIENTO DE LOS RAYOS X

Los rayos X no fueron desarrollados, sino descubiertos, y su hallazgo fue accidental. Durante las décadas de 1870 y 1880, muchos laboratorios físicos universitarios estaban investigando la conducción de los rayos catódicos mediante un gran tubo de cristal parcialmente al vacío conocido como **tubo de Crookes**. Sir William Crookes era un inglés de origen muy humilde que llegó a convertirse en un genio autodidacta.

El tubo que lleva su nombre fue el antecedente de las modernas lámparas fluorescentes y de los tubos de rayos X. Hubo muchos y diferentes tubos de Crookes; la mayoría de ellos eran capaces de producir rayos X. Wilhelm Roentgen estaba experimentando con un tipo de tubo de Crookes cuando descubrió los rayos X (fig. 1.5).

El 8 de noviembre de 1895, Roentgen estaba trabajando en su laboratorio de física en la Universidad de Würzburg, en Alemania. Había dejado a oscuras su laboratorio y había rodeado completamente el tubo de Crookes con papel fotográfico negro para poder apreciar mejor los efectos de los rayos catódicos en el tubo. Sucedió que en una estantería a pocos metros de distancia del tubo de Crookes había una placa cubierta con **platinocianuro de bario**, un material fluorescente.

El papel negro que envolvía el tubo de Crookes evitaba que escapara ninguna luz visible del tubo, pero Roentgen se dio cuenta de que el platinocianuro de bario brillaba. La intensidad del brillo aumentaba si la placa se acercaba al tubo; por tanto, había pocas dudas acerca del estímulo del brillo. Este brillo se denomina **fluorescencia**.



**FIGURA 1.5** Muestra del tipo de tubo de Crookes utilizado por Roentgen cuando descubrió los rayos X. Los rayos catódicos (electrones) que dejan el cátodo son atraídos al ánodo por el alto voltaje, donde producen los rayos X y la luz fluorescente. (Cortesía de Gary Leach, Memorial Hermann Hospital.)

**TABLA 1.1**

### Propiedades de los rayos X descritas inicialmente por Roentgen

1. Los rayos X son rayos invisibles muy penetrantes que constituyen una forma de radiación electromagnética
2. Los rayos X son eléctricamente neutros y, por ello, no se ven afectados por campos eléctricos o magnéticos
3. Los rayos X se pueden producir en una amplia variedad de energías y longitudes de onda
4. Los rayos X liberan cantidades muy pequeñas de calor tras atravesar la materia
5. Los rayos X viajan en línea recta
6. Los rayos X viajan a la velocidad de la luz,  $3 \times 10^8$  m/s en el vacío
7. Los rayos X pueden ionizar la materia
8. Los rayos X causan fluorescencia de determinados cristales
9. Los rayos X no se pueden enfocar con una lente
10. Los rayos X afectan a la película fotográfica
11. Los rayos X producen cambios químicos y biológicos en la materia mediante ionización y excitación
12. Los rayos X producen radiación secundaria y dispersa

La reacción inmediata de Roentgen para investigar esta «luz X», como él la denominó, fue interponer varios materiales (madera, aluminio, ¡su mano!) entre el tubo de Crookes y la placa fluorescente. ¡La «X» hacía referencia a lo desconocido! El científico siguió investigando de forma frenética durante varias semanas.

Las investigaciones iniciales de Roentgen fueron muy rigurosas y pudo divulgar sus resultados experimentales a la comunidad científica antes de finales de 1895 (tabla 1.1). En reconocimiento a este trabajo recibió el

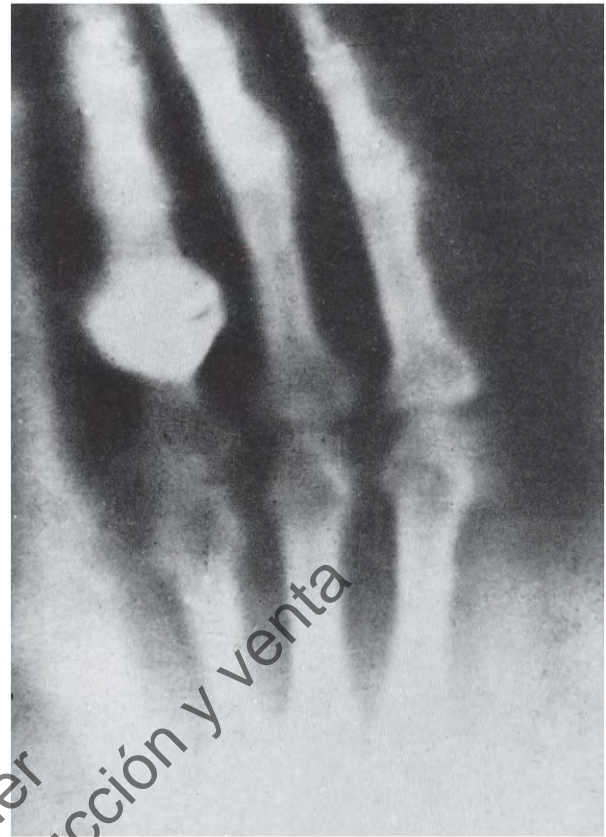
primer Premio Nobel de Física en 1901. Roentgen reconoció el valor de este descubrimiento para la medicina. Fue él quien produjo y publicó la primera imagen de rayos X médica a principios de 1896. Era una imagen de la mano de su mujer (fig. 1.6). La figura 1.7 es una fotografía de lo que se ha referido como la primera exploración de rayos X en EE. UU., realizada a principios de febrero de 1896 en el laboratorio de física del Dartmouth College.

En torno al descubrimiento de los rayos X se produjeron varios acontecimientos sorprendentes que lo hacen destacar entre los episodios notables de la historia de la humanidad. Primero, el hallazgo fue accidental. Segundo, probablemente no menos de doce contemporáneos de Roentgen ya habían observado previamente la radiación X, pero ninguno de esos físicos reconoció su significado ni la investigó. Tercero, Roentgen reaccionó a su descubrimiento con un vigor científico tal que en poco menos de 1 mes había descrito la radiación X con prácticamente todas las propiedades que conocemos hoy en día.

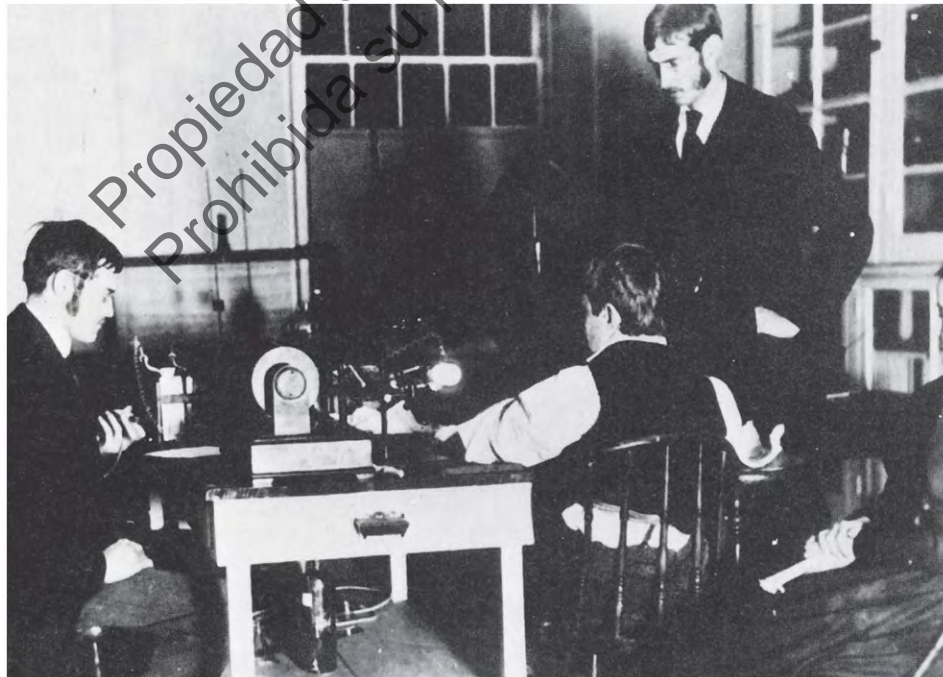
### DESARROLLO DE LAS TÉCNICAS DE IMAGEN MÉDICAS

Existen tres tipos de exploraciones con rayos X: la radiografía, la fluoroscopia y la TC. La radiografía utiliza un receptor de imagen (RI) de estado sólido y, por lo general, un tubo de rayos X montado en el techo sobre unos rieles que permiten desplazar el tubo en cualquier dirección. Estos exámenes suministran al radiólogo imágenes fijas.

La fluoroscopia se realiza habitualmente con un tubo de rayos X que se encuentra bajo la mesa de exploración sobre la que se coloca el paciente. Al radiólogo se le



**FIGURA 1.6** La mano que se muestra en esta radiografía es la de la Sra. Roentgen. Esta fue la primera indicación de las posibles aplicaciones médicas de los rayos X y se hizo a los pocos días del descubrimiento. (Cortesía del Deutsches Roentgen Museum.)



**FIGURA 1.7** Esta fotografía registra la primera exploración médica por rayos X en EE. UU. Un joven paciente, Eddie McCarthy, se rompió la muñeca mientras patinaba en el río Connecticut y se prestó a ser fotografiado por la «luz X». Le acompañan (de izquierda a derecha) el profesor E.B. Frost, del Dartmouth College, y su hermano, el Dr. G.D. Frost, Director Médico del Mary Hitchcock Hospital. El aparato fue montado por el profesor F.G. Austin en su laboratorio de física en Reed Hall, Dartmouth College, el 3 de febrero de 1896. (Cortesía del Mary Hitchcock Hospital.)

proporcionan imágenes en movimiento en un dispositivo de visualización digital.

La TC utiliza una fuente de rayos X giratoria y una matriz de detectores. Se adquiere un volumen de datos de tal manera que es posible reconstruir imágenes fijas en cualquier plano anatómico coronal, sagital, transversal u oblicuo.

Existen numerosas variaciones de estos tres tipos de exploraciones, pero en general el equipamiento de rayos X es similar.



Para proporcionar un haz de rayos X suficiente para obtener imágenes, se debe suministrar alto voltaje y suficiente corriente eléctrica al tubo de rayos X.

Los voltajes de rayos X se miden en kilovoltios pico (kVp). Un kV es equivalente a 1.000 V de potencial eléctrico. Las corrientes de rayos X se miden en miliamperios (mA), donde el amperio (A) es la medida de la corriente eléctrica. El prefijo **mili** significa 1/1.000 o 0,001.

**Pregunta:** La distancia habitual del receptor de imagen a la fuente de rayos X (SID, *source-to-image distance*) es 1 m. ¿A cuántos milímetros equivale?

**Respuesta:** 1 mm = 1/1.000 m o  $10^{-3}$ ; por tanto 1.000 mm = 1 m

Hoy día, el voltaje y la corriente se suministran a los tubos de rayos X a través de circuitos eléctricos bastante complicados, pero en los tiempos de Roentgen solo se disponía de generadores estáticos. Aquellas unidades únicamente podían suministrar corrientes de unos pocos miliamperios y voltajes de hasta 50 kVp. Hoy día son normales 1.000 mA y 150 kVp.

Los primeros procedimientos radiológicos necesitaban a menudo tiempos de exposición de 30 min o más. Los largos tiempos de exposición producían una imagen borrosa. Un desarrollo que ayudó a reducir este tiempo de exposición fue la utilización de **pantallas intensificadoras** fluorescentes asociadas a las placas de cristal fotográfico.

Se dice que Michael Pupin había demostrado las posibilidades de una pantalla de intensificación radiográfica en 1896, pero solo muchos años después esta técnica recibió un adecuado uso y reconocimiento. Las radiografías durante el tiempo de Roentgen se obtenían por exposición de una placa de vidrio con una capa de emulsión fotográfica en uno de los lados.

Charles L. Leonard descubrió que si se exponían dos placas de vidrio de rayos X con las capas de emulsión juntas, el tiempo de exposición se reducía a la mitad y se mejoraba notablemente la imagen. La demostración de la **radiografía de doble emulsión** se realizó en 1904, aunque esta técnica no se comercializó hasta 1918.

Muchas de las placas de vidrio de alta calidad utilizadas para radiografías provenían de Bélgica u otros



**FIGURA 1.8** Thomas Edison observa la mano de su desafortunado asistente, Clarence Dally, a través de un fluoroscopio diseñado por él. La mano de Dally permanece sobre la caja que contiene el tubo de rayos X.

países europeos. Este suministro se interrumpió durante la Primera Guerra Mundial, por lo que los radiólogos comenzaron a utilizar película en lugar de placas de vidrio.

Las necesidades militares de un mayor número de servicios radiológicos llevaron a buscar un material para sustituir las placas de vidrio. Este material fue el **nitrate de celulosa**, y rápidamente se hizo evidente que era mejor esta alternativa que la placa de vidrio original.

El **fluoroscopio** fue desarrollado en 1898 por el inventor americano Thomas A. Edison (fig. 1.8). El material fluorescente original de Edison fue el **platinocianuro de bario**, un material de laboratorio muy utilizado. Edison investigó las propiedades fluorescentes de más de 1.800 materiales, entre ellos el **sulfito de cadmio y zinc** y el **tungstato de calcio**, dos materiales que se usan actualmente.

No se sabe qué otros inventos habría desarrollado Edison si hubiera proseguido con su investigación con los rayos X, pero la abandonó cuando su ayudante y amigo durante largo tiempo, Clarence Dally, sufrió graves quemaduras por rayos X que obligaron a amputarle los dos brazos. Dally murió en 1904 y se cuenta como la primera víctima mortal de los rayos X en EE. UU.

Antes del inicio del siglo XX, un dentista de Boston, William Rollins, inventó dos aparatos para limitar la exposición de los pacientes a los rayos X y con ello reducir la posibilidad de que estos produjesen quemaduras. Rollins utilizaba los rayos X para tomar imágenes de los dientes y descubrió que al restringir el haz de rayos X con una lámina de plomo con un orificio en el centro, un **diafragma**, y colocar un filtro de cuero o de aluminio se mejoraba la calidad de las radiografías.

La primera aplicación de la **colimación** y la **filtración** se siguió de una adopción general muy lenta de estas técnicas. Finalmente se reconoció que estos aparatos reducían los riesgos de los rayos X.



Dos aportaciones simultáneas transformaron el uso de los rayos X, que pasaron de ser una novedad en manos de un puñado de físicos a una especialidad médica a gran escala y de alto valor. En 1907, H.C. Snook presentó una fuente de potencia de alto voltaje sustitutiva, un **transformador** sin interrupción, para las máquinas estáticas y las espirales de inducción que estaban entonces en uso.

Aunque el transformador de Snook era muy superior a otros aparatos, su capacidad excedía claramente la capacidad del tubo de Crookes. Hasta el desarrollo del tubo de Coolidge no se adoptó el uso del transformador de Snook de forma general.

El tipo de tubo de Crookes que Roentgen utilizó en 1895 se usó durante bastantes años. Aunque los trabajadores de rayos X hicieron ligeras modificaciones, permaneció esencialmente sin variaciones hasta la segunda década del siglo XX.

Tras numerosas comprobaciones médicas, William D. Coolidge presentó su tubo de rayos X de cátodo caliente a la comunidad médica en 1913. Muy pronto quedó clara su superioridad con respecto al tubo de Crookes. El tubo de Coolidge consistía en un tubo de vacío que permitía seleccionar los valores de intensidad y energía de los rayos X de forma separada y con gran precisión. Esto no había sido posible con los tubos rellenos de gas, con los que era difícil obtener los estándares necesarios para las técnicas de exploración. Los tubos de rayos X utilizados en la actualidad son versiones mejoradas del **tubo de Coolidge**.



La radiología se convirtió en una especialidad médica gracias al transformador de Snook y al tubo de rayos X de Coolidge.

La era de la radiografía moderna se inicia con el uso del tubo de Coolidge y con el transformador de Snook; solo entonces se hizo posible obtener los kilovoltios pico y niveles de miliamperios aceptables. Pocos acontecimientos desde entonces han influido tanto en la radiología médica.

En 1913, el alemán Gustav Bucky inventó la rejilla estacionaria («Glitterblende»); dos meses después solicitó una segunda patente para una rejilla móvil. En 1915, el estadounidense H. Potter, que probablemente no conocía la existencia de la patente de Bucky debido a la Primera Guerra Mundial, también inventó una rejilla móvil. En su favor cabe decir que Potter reconoció el trabajo de Bucky y la rejilla de Potter-Bucky se presentó en 1921.

En 1946 se probó el tubo de amplificación de luz en los Bell Telephone Laboratories y en 1950 se adaptó a la fluoroscopia como un tubo intensificador de imagen. Hoy día la fluoroscopia con intensificación de imagen está siendo sustituida por los RI de estado sólido.

En las últimas décadas se han introducido mejoras importantes en la imagen médica. La ecografía diagnóstica apareció en la década de 1960, así como las gammacámaras. La tomografía por emisión de positrones (PET, *positron emission tomography*) y la TC de rayos X se desarrollaron en

la década de 1970. La imagen por resonancia magnética se convirtió en una modalidad aceptada en la década de 1980 y en la actualidad la radiografía de pantalla-película y la fluoroscopia con intensificación de imagen están siendo sustituidas rápidamente por la radiografía digital y la fluoroscopia digital. La [tabla 1.2](#) resume cronológicamente algunos de los desarrollos más importantes.

## REGISTRO DE LESIONES POR RADIACIÓN

La primera víctima mortal por rayos X en EE. UU. se registró en 1904. Por desgracia, las lesiones por radiación fueron bastante frecuentes en los primeros años. Estas lesiones normalmente tomaban la forma de lesión cutánea (a veces grave), pérdida de cabello y anemia. Los médicos y, más a menudo, los pacientes sufrían lesiones, principalmente debido a que la baja energía de la radiación entonces disponible llevaba a la necesidad de tiempos de exposición largos para obtener imágenes aceptables.

Alrededor de 1910, estas lesiones agudas empezaron a ser controladas, cuando los efectos biológicos de los rayos X fueron investigados científicamente y publicados. Con la introducción del tubo de Coolidge y el transformador de Snook, la frecuencia del registro de lesiones de los tejidos superficiales disminuyó.

Años más tarde se descubrió que trastornos de la sangre como la anemia aplásica y la leucemia se desarrollaban en los radiólogos con mucha mayor frecuencia que en otros individuos. Estas observaciones dieron origen al desarrollo de aparatos y dispositivos protectores para los radiólogos, como guantes y delantales de plomo. Los trabajadores de la radiología fueron objeto de observaciones periódicas para detectar cualquier efecto de su exposición ocupacional y se les proporcionaron dispositivos personales de monitorización de la radiación. Esta atención a la seguridad frente a la radiación se ha mostrado eficaz.



Gracias a la aplicación de una protección eficaz frente a la radiación, en la actualidad la radiología se considera una ocupación segura.

## PROTECCIÓN BÁSICA DE LA RADIACIÓN

Actualmente, la preocupación por el control de la radiación en la radiología diagnóstica se centra en la protección de los pacientes. Los estudios actuales sugieren que incluso las bajas dosis de rayos X utilizadas en los procedimientos diagnósticos habituales pueden dar lugar a una pequeña incidencia de efectos perjudiciales latentes. También está bien establecido que los fetos humanos son sensibles a la radiación X al principio del embarazo.

El objetivo de esta introducción es insistir en la importancia de proporcionar una adecuada protección tanto a los técnicos en radiología como a los pacientes. A medida que avance en su formación en tecnología radiológica aprenderá rápidamente cómo manejar sus sistemas de imagen de rayos X de forma segura, con exposiciones

TABLA 1.2

## Fechas importantes en el desarrollo de la radiología moderna

Fecha	Acontecimiento	Fecha	Acontecimiento
1895	Roentgen descubre los rayos X	1974	Se introducen las pantallas intensificadoras radiográficas de tierras raras
1896	Se realizan las primeras aplicaciones médicas de los rayos X en el diagnóstico y tratamiento	1977	Mistretta presenta la fluoroscopia digital de sustracción
1900	Se funda la American Roentgen Society, la primera organización de radiología norteamericana	1979	Se otorga el Premio Nobel de Fisiología o Medicina a Allan Cormack y Godfrey Hounsfield por la TC
1901	Roentgen recibe el primer Premio Nobel de Física	1980	Se comercializa el primer sistema de RM de superconducción
1905	Einstein presenta su teoría de la relatividad y la famosa ecuación $E = mc^2$	1981	Barnes demuestra la radiografía de tórax con slot-scan
1907	Se introduce el transformador sin interrupción de Snook	1981	El Sistema Internacional de Medidas (SI) es adoptado por la International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU)
1913	Bohr desarrolla su teoría del modelo del átomo, presentando un núcleo y electrones planetarios	1982	Se presentan los sistemas de archivo y comunicación de imágenes (PACS, <i>picture archiving and communications system</i> )
1913	Se desarrolla el tubo de rayos X de filamento caliente de Coolidge	1983	Se desarrolla la primera emulsión de película de grano tabular (Eastman Kodak)
1917	La película con base de nitrato de celulosa se utiliza de forma generalizada	1984	Aparecen los primeros fósforos estimulables por láser para radiografía computarizada (Fuji)
1920	Varios investigadores muestran el uso de componentes solubles de yodo como medio de contraste	1988	Primer uso de un aparato de interferencia cuántica superconductor (SQUID) para magnetoencefalografía (MEG)
1920	Se funda la American Society of Radiologic Technologists (ASRT)	1989	El NCRP y la mayoría de las sociedades científicas y médicas adoptan el SI
1921	Se presenta la rejilla de Potter-Bucky	1990	Se fabrica el último sistema de xeromamografía
1922	Compton describe la dispersión de los rayos X	1990	Se presenta la TC helicoidal (Toshiba)
1923	Se introduce la película «segura» de rayos X de acetato de celulosa (Eastman Kodak)	1991	Se desarrolla la TC doble helicoidal (Elscent)
1925	Se organiza en Londres el First International Congress of Radiology	1992	Se aprueba la Ley de Estándares en Calidad de la Mamografía (MQSA, <i>Mammography Quality Standard Acts</i> )
1928	El roentgen se establece como la unidad de medida de la intensidad de los rayos X	1998	Se desarrolla la radiografía digital directa que utiliza transistores de película fina (TFT, <i>thin-film transistors</i> )
1929	Forssmann demuestra la cateterización cardiaca... ¡sobre sí mismo!	1997	Swissray presenta un sistema de radiografía digital con un dispositivo de carga acoplada (CCD, <i>charge-coupled device</i> )
1929	Se introduce el tubo de ánodo giratorio	1997	Rowlands presenta el receptor de imagen de panel plano de selenio amorfo
1930	Los aparatos de tomografía son mostrados por numerosos investigadores independientes	1998	Se presenta la TC multihelicoidal (General Electric)
1932	Se añade la tinta azul a la película de rayos X (DuPont)	1998	Se demuestra el uso para la radiografía digital de silicio amorfo
1932	El U.S. Committee on X-ray and Radium Protection (ahora NCRP) promulga las primeras dosis límite	2000	Se dispone del primer sistema directo de imagen mamográfica digital (General Electric)
1942	Morgan muestra un aparato con fototomizador electrónico	2002	Se introduce la TC helicoidal de 16 cortes
1942	Se introduce el primer procesador automático de película (Pako)	2002	La tomografía por emisión de positrones (PET, <i>positron emission tomography</i> ) se utiliza de forma habitual en los servicios clínicos
1948	Coltman desarrolla el primer intensificador de imagen fluoroscópico	2003	Se otorga el Premio Nobel de Fisiología o Medicina a Paul Lauterbur y a Sir Peter Mansfield por la RM
1951	Se presenta la tomografía multidireccional (politomografía)	2003	Desarrollo de la tomosíntesis digital
1953	El rad se adopta oficialmente como la unidad de medida de la dosis absorbida	2004	Se presenta la TC helicoidal de 64 cortes
1956	Se presenta la xerorradiografía	2005	Se presenta la TC de doble fuente (Siemens)
1956	Se realiza el primer procesado de película con transporte por rodillos automático (Eastman Kodak)	2007	Se presenta la TC helicoidal de 320 cortes (Toshiba)
1960	Se fabrica la película con base de poliéster (DuPont)	2009	Se publica el informe del NCRP n.º 160, <i>Ionizing radiation exposure of the population of the United States: 2006</i>
1963	Kuhl y Edwards presentan la tomografía computarizada por emisión de fotón único (SPECT, <i>single-photon emission computed tomography</i> )	2011	Aprobación clínica de la tomosíntesis mamográfica digital
1965	Se introduce el procesador de revelado rápido de 90 s (Eastman Kodak)	2012	Descubrimiento del bosón de Higgs en el gran colisionador de hadrones del CERN, Suiza
1966	Se inicia la utilización habitual del diagnóstico por ultrasonidos	2017	Las impresoras 3D y los algoritmos de segmentación amplían las aplicaciones de la TC y la RM
1972	Se comercializan la película de emulsión simple y los chasis para mamografías con una sola pantalla (DuPont)	2018	La inteligencia artificial (IA) aparece en revistas y reuniones especiales
1973	Hounsfield completa el desarrollo del primer sistema de imagen de tomografía computarizada (TC) (EMI)		
1973	Damadian y Lauterbur producen la primera imagen de resonancia magnética (RM)		

mínimas a la radiación, siguiendo los procedimientos estándar de protección de la radiación.

Es conveniente hacer una advertencia en estas primeras fases de su aprendizaje. Después de haber trabajado con sistemas de imagen de rayos X, llegará a sentirse tan familiarizado con su ambiente laboral que tal vez pueda descuidar el control de la radiación. No se permita desarrollar esta actitud, ya que podría conducirle a una exposición innecesaria a las radiaciones. La protección de la radiación debería ser una consideración importante durante todo procedimiento de radiología. La [tabla 1.3](#) registra los diez mandamientos de la protección de la radiación.



Se seguirá siempre el criterio ALARA (*as low as reasonably achievable*): mantener las exposiciones de radiación tan bajas como sea razonablemente posible.

La minimización de la exposición a la radiación de técnicos en radiología y pacientes es fácil si se reconocen y se entienden los sistemas de rayos X diseñados para este propósito. A continuación, se presenta una breve descripción de algunos de los sistemas de protección principal de la radiación.

### Ropa de protección

Los guantes y delantales que usan los técnicos en radiología durante la fluoroscopia y algunos procedimientos radiológicos se fabrican con un material impregnado de plomo.

### Protección gonadal

El mismo material impregnado de plomo que se utiliza para confeccionar guantes y delantales se emplea para fabricar protectores gonadales. Todas las personas en edad fértil o menores deben usarlos cuando las gónadas están en o cerca del haz útil de rayos X y siempre que la utilización de estos protectores no interfiera con el valor diagnóstico de la exploración.

### Barreras protectoras

La consola de control radiográfico o de TC siempre está localizada detrás de una barrera protectora. Con frecuencia, la barrera es de planchas de plomo y está equipada con una ventana de vidrio plomado. En circunstancias normales, el personal permanece detrás de la barrera durante la exploración radiológica. La [figura 1.9](#) muestra un ejemplo de una sala de exploración radiográfica y fluoroscópica. Se muestran muchos de los elementos de seguridad de la radiación.

También deben seguirse otros procedimientos. Las exploraciones de rayos X abdominales y pélvicas de una gestante nunca deben realizarse durante el primer trimestre a menos que sea absolutamente necesario. Se invertirán todos los esfuerzos posibles en asegurar que una exploración no tendrá que repetirse debido a un error técnico, ya que las exploraciones repetidas someten al paciente al doble de la radiación necesaria.

Cuando se protege a un paciente con un blindaje para someterlo a una exploración radiológica debe conside-

**TABLA 1.3**

### Los diez mandamientos de la protección de la radiación

1. Comprenda y aplique los puntos fundamentales de la protección radiológica: tiempo, distancia y blindajes
2. No permita que la familiaridad le induzca una falsa sensación de seguridad
3. Nunca se sitúe delante del haz primario
4. Lleve siempre vestimenta de protección si no está tras una barrera de protección
5. Lleve siempre un dosímetro, en algunos países debe colocarlo en el cuello, por fuera del delantal de protección
6. Nunca sostenga a un paciente durante una exploración radiológica. Utilice dispositivos mecánicos cuando sea posible y procure que sean los parientes o amigos del paciente quienes le asistan
7. La persona que sostenga al paciente deberá llevar siempre un delantal protector y, a ser posible, unas gafas protectoras
8. Utilice protectores gonadales en toda persona en edad fértil cuando su uso no interfiera con la exploración
9. La exploración de la pelvis y del bajo abdomen en una paciente embarazada debería evitarse siempre que sea posible, especialmente en el primer trimestre
10. Siempre colime el haz de forma adecuada al mínimo tamaño de campo posible para la exploración

rarse la historia clínica. Excepto en procesos de cribado (*screening*), la exploración radiológica en pacientes asintomáticos no es aceptable.

Los pacientes que requieran ayuda durante la exploración nunca deben ser asistidos por personal de radiología. En su lugar, deben utilizarse dispositivos de sujeción mecánicos. Cuando sea preciso, un miembro de la familia del paciente, debidamente protegido, ofrecerá la asistencia necesaria.

### Filtración

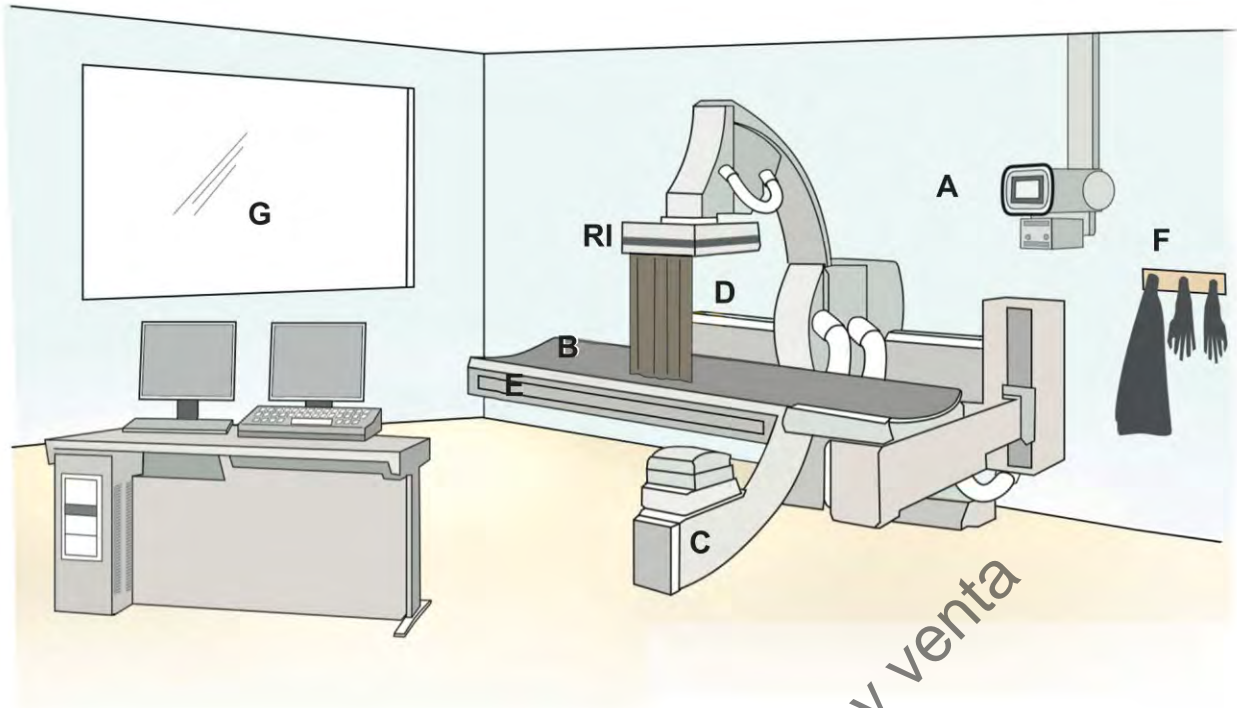
En el interior del tubo de rayos X hay insertados filtros de metal (normalmente de aluminio o de cobre), de manera que los rayos de baja energía se absorben antes de que alcancen al paciente. Estos rayos X tienen escaso valor diagnóstico.

### Colimación

La colimación restringe el haz útil de rayos X, ajustándolo al tamaño de la parte del cuerpo de la que debe tomarse una imagen y, por tanto, protege los tejidos adyacentes de una exposición innecesaria a la radiación. Los colimadores presentan formas muy diversas. Los más utilizados son los colimadores luminosos ajustables. La colimación también reduce la radiación dispersa y, de esta forma, mejora el contraste de la imagen.

## TERMINOLOGÍA RADIOLÓGICA

Cada profesión tiene su propio lenguaje. La radiología no es una excepción. Ya se han abordado varios términos y expresiones características de la radiología; a lo largo de este libro se usarán y definirán muchos más. De momento será suficiente con una introducción a dicha terminología.



**FIGURA 1.9** El sistema de imagen radiográfica y fluoroscópica de uso general habitualmente incluye un tubo radiográfico suspendido en el techo (A) y una mesa fluoroscópica de exploración (B) con un tubo de rayos X debajo de la mesa (C). Algunos de los dispositivos de protección frente a la radiación más frecuentes son la cortina de plomo (D), la ranura de Bucky (E), delantal y guantes con plomo (F) y la ventana plomada (G). Se muestran también la localización del receptor de imagen (RI) y el equipo de imagen asociado.

### Prefijos numéricos

A menudo en radiología debemos utilizar múltiplos muy grandes o muy pequeños de unidades estándar. Dos unidades, el miliamperio (mA) y el kilovoltaje pico (kVp), ya se han tratado. Cuando se escribe 70 kVp en lugar de 70.000 voltios pico, se expresa de manera comprensible la misma cantidad con menos caracteres. Para esta expresión reducida los científicos han diseñado un sistema de prefijos y símbolos (tabla 1.4).

**Pregunta:** ¿Cuántos kilovoltios equivalen a 37.000 V?

**Respuesta:**  $37.000 \text{ V} = 37 \times 10^3 \text{ V}$   
 $= 37 \text{ kV}$

**Pregunta:** El diámetro de una célula sanguínea es de aproximadamente  $10 \mu\text{m}$ . ¿A cuántos metros equivale?

**Respuesta:**  $10 \mu\text{m} = 10 \times 10^{-6} \text{ m}$   
 $= 10^{-5} \text{ m}$   
 $= 0,00001 \text{ m}$

### Unidades radiológicas

Las cuatro unidades empleadas para medir la radiación deberían ser familiares en nuestro vocabulario. La figura 1.10 las relaciona con una hipotética situación en las que se deberían utilizar. La tabla 1.5 muestra la relación entre las unidades radiológicas antiguas y sus equivalentes en el SI.

**TABLA 1.4**

Prefijos científicos y de ingeniería estandarizados\*

Múltiplo	Prefijo	Símbolo
$10^{18}$	exa-	E
$10^{15}$	peta-	P
$10^{12}$	<b>tera-</b>	<b>T</b>
$10^9$	<b>giga-</b>	<b>G</b>
$10^6$	<b>mega-</b>	<b>M</b>
$10^3$	<b>kilo-</b>	<b>k</b>
$10^2$	hecto-	h
10	deca-	da
$10^{-1}$	deci-	d
$10^{-2}$	<b>centi-</b>	<b>c</b>
$10^{-3}$	<b>mili-</b>	<b>m</b>
$10^{-6}$	<b>micro-</b>	<b><math>\mu</math></b>
$10^{-9}$	<b>nano-</b>	<b>n</b>
$10^{-12}$	pico-	p
$10^{-15}$	femto-	f
$10^{-18}$	atto-	a

\*Se han resaltado en negrita aquellos prefijos y símbolos empleados con mayor frecuencia en la ciencia radiológica.

En 1981, la International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) propuso las unidades estándar basadas en el SI que, desde entonces, han sido adoptadas por todos los países excepto EE. UU. El NCRP y

todas las sociedades científicas y médicas de EE. UU. adoptaron las unidades del SI a principios de la década de 1990. En 2017, el American Registry of Radiologic Technologists (ARRT) adoptó el SI en su proceso de examen.

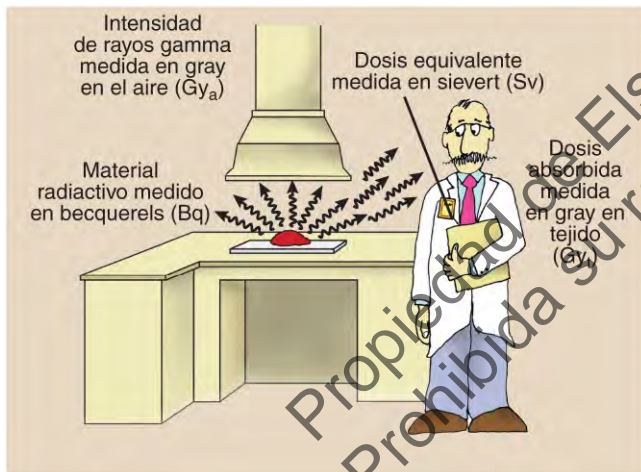
**Kerma en aire (energía cinética liberada en la materia) ( $Gy_a$ ).** El kerma en aire es la energía cinética transferida desde los fotones a los electrones durante la ionización y la excitación. El kerma en aire se mide en julios por kilogramo (J/kg), de manera que 1 J/kg es 1 gray ( $Gy_a$ ).

Para mantener la adopción del método de Wagner/Archer descrito en el prólogo, la unidad de SI de kerma en aire se utiliza para expresar la exposición a radiación.



El kerma en aire ( $Gy_a$ ) es la unidad de exposición a radiación.

**Dosis absorbida ( $Gy_t$ ).** Los efectos biológicos suelen estar relacionados con la dosis de radiación absorbida (rad, *radiation absorbed dose*). La dosis absorbida es la energía de radiación absorbida por unidad de masa y se expresa en unidades de J/kg o  $Gy_t$ . Las unidades  $Gy_a$  y  $Gy_t$  se refieren a dosis de radiación en el aire y en el tejido, respectivamente. Para un valor dado de kerma en aire



**FIGURA 1.10** La radiación es emitida por un material radiactivo. La cantidad de material radiactivo se mide en becquerels. La cantidad de radiación se mide en grays o sieverts, según su uso concreto.

(exposición a radiación), la dosis absorbida depende del tipo de tejido sometido a irradiación. Se hablará más en detalle de estas cuestiones en los capítulos 9 y 37.



El gray ( $Gy_t$ ) es la unidad de dosis de radiación absorbida (rad).

**Dosis equivalente, sievert (Sv).** Los dispositivos de monitorización de la radiación en los profesionales se analizan en sieverts, que se utiliza para expresar la cantidad de radiación recibida por los trabajadores de entornos con radiación y la población en general. También expresa la dosis del paciente en una irradiación corporal parcial.

Algunos tipos de radiación producen más perjuicio que los rayos X. El sievert da cuenta de estas diferencias en la eficacia biológica. Resulta especialmente importante en personas que trabajan cerca de reactores nucleares o aceleradores de partículas. En el capítulo 35 se comenta más en profundidad la dosis equivalente.

La figura 1.11 resume la conversión entre las unidades tradicionales de exposición a radiación profesional y las unidades del SI.



El sievert (Sv) es la unidad de exposición a radiación profesional y de dosis equivalente.

**Radiactividad, becquerel (Bq).** El becquerel es la unidad de cantidad de material radiactivo, no la radiación emitida por dicho material. Un becquerel es la cantidad de radiactividad en la que un núcleo se desintegra en cada segundo (1 d/s = 1 Bq). En los materiales radiactivos suelen utilizarse cantidades de megabecquerels (MBq). La unidad tradicional de radiactividad era el curie (Ci), que se define como 1 Ci =  $3,7 \times 10^{10}$  Bq.

La radiactividad y el becquerel no tienen nada que ver con los rayos X.



El becquerel (Bq) es la unidad de radiactividad.

**TABLA 1.5** Medidas especiales de radiología y sus unidades especiales asociadas

Medida	UNIDADES CONVENCIONALES		UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL (SI)	
	Nombre	Símbolo	Nombre	Símbolo
Exposición	roentgen	R	kerma en aire	$Gy_a$
Dosis absorbida	rad	rad	gray	$Gy_t$
Dosis equivalente	rem	rem	sievert	Sv
Radiactividad	curio	Ci	becquerel	Bq
Multiplicar	R	por	para obtener	$Gy_a$
Multiplicar	rad	por	para obtener	$Gy_t$
Multiplicar	rem	por	para obtener	Sv
Multiplicar	Ci	por	para obtener	Bq

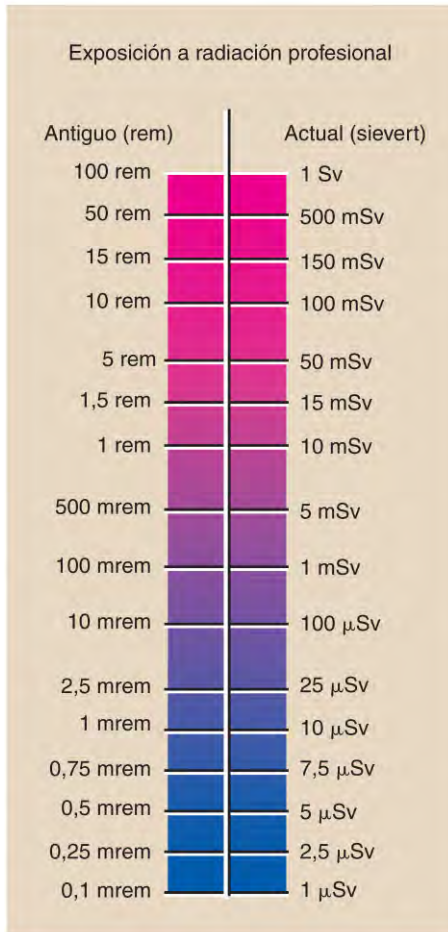


FIGURA 1.11 Escalas para la dosis equivalente

**Pregunta:** Para un radioinmunoensayo se utilizan 0,05  $\mu$ Ci de yodo 125. ¿Cuál es el valor de la radiactividad en becquerels?

**Respuesta:**  $0,05 \mu\text{Ci} = 0,05 \times 10^{-6} \text{ Ci}$   
 $= (0,05 \times 10^{-6} \text{ Ci})(3,7 \times 10^{10} \text{ Bq/Ci})$   
 $= 0,185 \times 10^4 \text{ Bq} = 1.850 \text{ Bq}$

## EQUIPO MÉDICO DE DIAGNÓSTICO POR IMAGEN

Para llegar a formar parte de esta estimulante profesión, un estudiante debe completar los cursos académicos indicados, acumular experiencia clínica y superar el examen de certificación nacional del ARRT. Tanto la experiencia académica como la habilidad clínica son necesarias para los técnicos en radiología (tabla 1.6).

Los programas de formación en radiología acreditados por el Joint Review Committee on Education in Radiologic Technology (JRCERT) deben seguir un programa docente adoptado por el JRCERT. Uno de ellos es el último programa de radiografía de la American Society of Radiologic Technologists (ASRT) ([www.asrt.org/docs/curriculum](http://www.asrt.org/docs/curriculum)), que define un cuerpo común de conocimientos y es esencial para la formación básica de los técnicos.

El examen de certificación nacional para técnicos es administrado por el ARRT. El objetivo principal de los exámenes del ARRT es evaluar el conocimiento y las habilidades cognitivas básicas que necesitan los técnicos para desempeñar su trabajo. El documento especificaciones de contenido para el examen en radiografía (Content

TABLA 1.6

Inventario de tareas para realizar una radiografía requeridas por el American Registry of Radiologic Technologists

### ATENCIÓN AL PACIENTE

1. Confirme la identidad del paciente
2. Evalúe la capacidad del paciente para comprender y cumplir los requisitos de la exploración solicitada
3. Explique y confirme la preparación del paciente (p. ej., restricciones dietéticas, medicamentos preparatorios) antes de realizar las exploraciones radiográficas/fluoroscópicas
4. Examine los requerimientos radiográficos para verificar la precisión y la totalidad de la información (p. ej., historia del paciente, diagnóstico clínico)
5. Secuencie las exploraciones radiológicas para evitar los efectos del material de contraste residual en futuras exploraciones
6. Responsabilícese del equipamiento médico que puedan llevar los pacientes (p. ej., vías intravenosas, oxígeno) durante los procedimientos radiográficos
7. Ofrezca seguridad y comodidad al paciente, y muestre una actitud respetuosa
8. Comunique los retrasos de programación a los pacientes que están esperando
9. Verifique u obtenga el consentimiento informado del paciente si es necesario (p. ej., en estudios con contraste)
10. Explique las instrucciones del procedimiento al paciente o a su familia
11. Aplique las precauciones estándar
12. Siga los procedimientos adecuados cuando esté en contacto con un paciente en aislamiento
13. Utilice los dispositivos de inmovilización cuando esté indicado, con el fin de evitar que el paciente se mueva
14. Use la mecánica corporal adecuada y/o ayúdese con los dispositivos de transferencia mecánicos apropiados al movilizar al paciente
15. Antes de administrar un medio de contraste, reúna información para determinar la dosis adecuada y averiguar si el paciente presenta riesgo de sufrir una reacción adversa
16. Confirme el tipo de medio de contraste que va a utilizar y prepárelo para administrarlo
17. Utilice una técnica estéril o aséptica cuando esté indicado
18. Realice la punción venosa
19. Administre el medio de contraste intravenoso

(Continúa)

TABLA 1.6

**Inventario de tareas para realizar una radiografía requeridas por el American Registry of Radiologic Technologists (cont.)**

20. Observe al paciente después de la administración del medio de contraste para detectar reacciones adversas
21. Compruebe las constantes vitales
22. Reconozca la necesidad de una atención médica inmediata y administre cuidados de emergencia
23. Explique las instrucciones posteriores al procedimiento al paciente o a su familia
24. Mantenga la confidencialidad de la información del paciente
25. Documente la información necesaria (p. ej., requisitos radiológicos, radiografías) en la historia clínica del paciente

**PROTECCIÓN DE LA RADIACIÓN**

26. Lave, desinfecte o esterilice las instalaciones y el equipo; deseche los elementos contaminados en preparación para la siguiente exploración
27. Evalúe la necesidad y el uso de protectores en el paciente
28. Adopte las precauciones adecuadas para minimizar la exposición a la radiación del paciente
29. Pregunte a las pacientes de edad fértil sobre la posibilidad de que estén embarazadas y adopte la acción adecuada (es decir, documente la respuesta, contacte con el médico)
30. Colime el haz para limitar el área de exposición, mejorar la calidad de imagen y reducir la dosis de radiación
31. Ajuste el kVp, el mA y el tiempo o utilice un sistema de exposición automatizado para obtener una calidad de imagen óptima, unas condiciones de operatividad seguras y una dosis mínima de radiación
32. Evite que las personas cuya presencia sea innecesaria permanezcan en el área durante la exposición a los rayos X
33. Adopte las precauciones adecuadas para minimizar la exposición a la radiación profesional
34. Lleve un dosímetro mientras trabaja
35. Evalúe los informes dosimétricos individuales de exposición profesional para determinar si los valores del periodo de notificación están dentro de los límites establecidos

**FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO**

36. Prepare y ponga en marcha la unidad radiográfica y los accesorios
37. Prepare y ponga en marcha la unidad fluoroscópica y los accesorios
38. Prepare y ponga en marcha las unidades especializadas
39. Prepare y ponga en marcha los dispositivos de imagen digital

**PRODUCCIÓN DE IMÁGENES**

40. Retire del paciente o de la mesa todos los materiales radiopacos que podrían interferir en la imagen radiográfica
41. Seleccione el equipamiento y los accesorios adecuados (p. ej., rejilla, filtros de compensación, protector) para la exploración solicitada
42. Utilice marcadores radiopacos para indicar el lado anatómico, la posición u otra información importante (p. ej., tiempo, de pie, decúbito, posmicción)
43. Explique las instrucciones de respiración antes de empezar la exposición
44. Coloque al paciente para demostrar la anatomía deseada con marcadores de posición corporal
45. Determine los factores de exposición adecuados utilizando colimadores y tablas técnicas
46. Modifique los factores de exposición para circunstancias como movimiento involuntario, yesos y férulas, estados patológicos o pacientes incapaces de colaborar
47. Procese la imagen expuesta
48. Prepare el receptor de imagen digital o computarizada
49. Verifique la exactitud de la identificación del paciente en el procedimiento radiológico
50. Evalúe la calidad diagnóstica de las radiografías
51. Determine las medidas correctoras que deberían usarse si la radiografía no tiene calidad diagnóstica y realice la modificación adecuada
52. Almacene y manipule la película/casete de forma que se reduzca la posibilidad de producción de artefactos

**MANTENIMIENTO DEL EQUIPO**

53. Identifique y notifique el mal funcionamiento de la unidad y accesorios radiográficos o fluoroscópicos
54. Realice las evaluaciones básicas del equipo y los accesorios radiológicos
55. Identifique y notifique el mal funcionamiento del equipo de procesado
56. Realice evaluaciones básicas del equipo y accesorios de procesado

**PROCEDIMIENTOS RADIOGRÁFICOS**

57. Coloque al paciente, el tubo de rayos X y el receptor de imagen para obtener imágenes diagnósticas de:
  - a. Tórax
  - b. Estudios de abdomen y gastrointestinales
  - c. Estudios urológicos
  - d. Columna vertebral y pelvis
  - e. Cráneo
  - f. Extremidades
  - g. Otros: artrografía, mielografía, flebografía, etc.

*Specifications for Radiography Examination*, [www.asrt.org/docs/content-specification](http://www.asrt.org/docs/content-specification)) del ARRT describe los temas que se abordan en el examen. Además, el inventario de tareas (*Task Inventory*, [+p://www.asrt.org/docs/task-inventory](http://www.asrt.org/docs/task-inventory)) del ARRT enumera las responsabilidades laborales básicas que corresponden a los técnicos de radiología.

La práctica de todas las profesiones médicas tiene un ámbito que define parámetros e identifica límites para su correspondiente práctica, y se describe como una lista de tareas adecuadas como parte del trabajo del individuo que ha recibido una formación y tiene competencias clínicas para esa profesión. El ámbito práctico de los técnicos de radiología es definido por la ASRT dentro de las normas de práctica de radiografía (*Radiography Practice Standards*, [www.asrt.org/docs/practice-standards](http://www.asrt.org/docs/practice-standards)). Las leyes federales y estatales y las normativas de acreditación son necesarias para la participación en un servicio de radiología diagnóstica como técnico en radiología.

---

## RESUMEN

La radiología ofrece una profesión en numerosas áreas de la imagen médica y requiere un conocimiento de medicina, biología y física (radiología). Este primer capítulo ofrece una introducción a la historia y al desarrollo de la radiología, además de a la física médica.

La física médica incluye el estudio de la materia, la energía y el espectro electromagnético del cual los rayos X forman parte. La producción de radiación X y su uso diagnóstico seguro conforman la base del diagnóstico por imagen. Además de resaltar la importancia de la seguridad frente a la radiación, este capítulo presenta una lista detallada de las competencias clínicas y de cuidado del paciente que son necesarias para los técnicos en pruebas de imagen médicas.

Este capítulo presenta también los diferentes patrones de medida y los aplica a los conceptos asociados con varios campos dentro de la radiología. Los aspectos técnicos de la radiología exigen la identificación y el uso adecuado de las unidades de medida de la radiación.

Propiedad de Elsevier  
Prohibida su reproducción y venta