

El accidente de Fukushima Daiichi



Informe del Director General



IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

EL ACCIDENTE DE FUKUSHIMA DAIICHI

INFORME DEL DIRECTOR GENERAL

Los siguientes Estados son Miembros del Organismo Internacional de Energía Atómica:

AFGANISTÁN	FIJI	OMÁN
ALBANIA	FILIPINAS	PAÍSES BAJOS
ALEMANIA	FINLANDIA	PAKISTÁN
ANGOLA	FRANCIA	PALAU
ARABIA SAUDITA	GABÓN	PANAMÁ
ARGELIA	GEORGIA	PAPUA NUEVA GUINEA
ARGENTINA	GHANA	PARAGUAY
ARMENIA	GRECIA	PERÚ
AUSTRALIA	GUATEMALA	POLONIA
AUSTRIA	GUYANA	PORTUGAL
AZERBAIYÁN	HAITÍ	QATAR
BAHAMAS	HONDURAS	REINO UNIDO DE
BAHREIN	HUNGRÍA	GRAN BRETAÑA E
BANGLADESH	INDIA	IRLANDA DEL NORTE
BELARÚS	INDONESIA	REPÚBLICA ÁRABE SIRIA
BÉLGICA	IRÁN, REPÚBLICA	REPÚBLICA
BELICE	ISLÁMICA DEL	CENTROAFRICANA
BENIN	IRAQ	REPÚBLICA CHECA
BOLIVIA, ESTADO	IRLANDA	REPÚBLICA DE MOLDOVA
PLURINACIONAL DE	ISLANDIA	REPÚBLICA DEMOCRÁTICA
BOSNIA Y HERZEGOVINA	ISLAS MARSHALL	DEL CONGO
BOTSWANA	ISRAEL	REPÚBLICA DEMOCRÁTICA
BRASIL	ITALIA	POPULAR LAO
BRUNEI DARUSSALAM	JAMAICA	REPÚBLICA DOMINICANA
BULGARIA	JAPÓN	REPÚBLICA UNIDA
BURKINA FASO	JORDANIA	DE TANZANÍA
BURUNDI	KAZAJSTÁN	RUMANIA
CAMBOYA	KENYA	RWANDA
CAMERÚN	KIRGUISTÁN	SAN MARINO
CANADÁ	KUWAIT	SANTA SEDE
CHAD	LESOTHO	SENEGAL
CHILE	LETONIA	SERBIA
CHINA	LÍBANO	SEYCHELLES
CHIPRE	LIBERIA	SIERRA LEONA
COLOMBIA	LIBIA	SINGAPUR
CONGO	LIECHTENSTEIN	SRI LANKA
COREA, REPÚBLICA DE	LITUANIA	SUDÁFRICA
COSTA RICA	LUXEMBURGO	SUDÁN
CÔTE D'IVOIRE	MADAGASCAR	SUECIA
CROACIA	MALASIA	SUIZA
CUBA	MALAWI	SWAZILANDIA
DINAMARCA	MALÍ	TAILANDIA
DJIBOUTI	MALTA	TAYIKISTÁN
DOMINICA	MARRUECOS	TOGO
ECUADOR	MAURICIO	TRINIDAD Y TABAGO
EGIPTO	MAURITANIA	TÚNEZ
EL SALVADOR	MÉXICO	TURQUÍA
EMIRATOS ÁRABES UNIDOS	MÓNACO	UCRANIA
ERITREA	MONGOLIA	UGANDA
ESLOVAQUIA	MONTENEGRO	URUGUAY
ESLOVENIA	MOZAMBIQUE	UZBEKISTÁN
ESPAÑA	MYANMAR	VENEZUELA, REPÚBLICA
ESTADOS UNIDOS	NAMIBIA	BOLIVARIANA DE
DE AMÉRICA	NEPAL	VIET NAM
ESTONIA	NICARAGUA	YEMEN
ETIOPÍA	NÍGER	ZAMBIA
EX REPÚBLICA YUGOSLAVA	NIGERIA	ZIMBABWE
DE MACEDONIA	NORUEGA	
FEDERACIÓN DE RUSIA	NUEVA ZELANDIA	

El Estatuto del Organismo fue aprobado el 23 de octubre de 1956 en la Conferencia sobre el Estatuto del OIEA celebrada en la Sede de las Naciones Unidas (Nueva York); entró en vigor el 29 de julio de 1957. El Organismo tiene la Sede en Viena. Su principal objetivo es “acelerar y aumentar la contribución de la energía atómica a la paz, la salud y la prosperidad en el mundo entero”.

EL ACCIDENTE DE FUKUSHIMA DAIICHI

INFORME DEL DIRECTOR GENERAL

PRÓLOGO

**Por Yukiya Amano
Director General**

El presente informe contiene una evaluación de las causas y consecuencias del accidente de la central nuclear de Fukushima Daiichi en el Japón que comenzó el 11 de marzo de 2011. Causado por un enorme tsunami tras un terremoto masivo, fue el peor accidente en una central nuclear desde el desastre de Chernóbil de 1986.

En el informe se analizan los factores humanos, organizativos y técnicos y se ha procurado ofrecer una visión de lo que sucedió y por qué, a fin de que los gobiernos, los reguladores y las entidades explotadoras de las centrales nucleares de todo el mundo puedan aplicar las enseñanzas extraídas que correspondan. También se examinan las medidas adoptadas en respuesta al accidente, tanto en el Japón como en el plano internacional.

No se deben olvidar las inmensas repercusiones del accidente de Fukushima Daiichi en los seres humanos. Más de 100 000 personas fueron evacuadas a causa de la emisión de radionucleidos al medio ambiente. Cuando se redactó el presente informe, en 2015, muchas de ellas no podían regresar aún a sus hogares.

Visité la central de Fukushima Daiichi pocos meses después del accidente y vi por mí mismo las potentes y destructivas consecuencias del tsunami. Fue una experiencia terrible y aleccionadora.

Pero me impresionaron hondamente la valentía y la entrega de los trabajadores y directivos que permanecieron en sus puestos después del tsunami y que lucharon, en difícilísimas condiciones, para controlar los reactores que habían sufrido daños. Tuvieron que improvisar una respuesta, en muchos casos sin el equipo adecuado, en circunstancias para las que no habían sido capacitados. Se merecen nuestro respeto y admiración.

Un importante factor que contribuyó al accidente fue el extendido supuesto en el Japón de que sus centrales nucleares eran tan seguras que un accidente de semejante magnitud era sencillamente impensable. Ese supuesto fue aceptado por las entidades explotadoras de las centrales nucleares, y ni los reguladores ni el Gobierno lo pusieron en tela de juicio. Como consecuencia de ello, en marzo de 2011 el Japón no estaba suficientemente preparado para un accidente nuclear severo.

El accidente de Fukushima Daiichi sacó a la luz ciertas deficiencias del marco regulador del Japón. Las responsabilidades estaban divididas entre varios organismos, y no estaba siempre claro en cuál de ellos residía la autoridad.

También había algunas deficiencias en el diseño de la central, en las disposiciones de preparación y respuesta en situaciones de emergencia y en la planificación de la gestión de un accidente severo. Se daba por supuesto que nunca habría una pérdida total de suministro eléctrico en una central nuclear más que durante un breve período. No se contempló la posibilidad de que varios reactores de una misma instalación sufriesen una crisis al mismo tiempo. Y no se tuvo suficientemente en cuenta la posibilidad de que se produjese un accidente nuclear al mismo tiempo que un grave desastre natural.

Desde el accidente, el Japón ha reformado su sistema regulador para cumplir mejor las normas internacionales. Ha otorgado a los reguladores responsabilidades más claras y mayor autoridad. El nuevo marco regulador será examinado por expertos internacionales por medio de una misión del Servicio Integrado de Examen de la Situación Reglamentaria del OIEA. También se han reforzado las disposiciones en materia de preparación y respuesta en situaciones de emergencia.

Otros países respondieron al accidente con medidas consistentes en realizar ‘pruebas de resistencia’ para reevaluar el diseño de las centrales nucleares habida cuenta de los peligros naturales extremos propios de sus emplazamientos, instalando más fuentes de energía eléctrica y suministros de agua de reserva, y reforzando la protección de las centrales contra sucesos externos extremos.

Aunque la seguridad nuclear sigue siendo responsabilidad de cada país, los accidentes nucleares pueden trascender las fronteras nacionales. El accidente de Fukushima Daiichi puso de relieve la importancia vital de una cooperación internacional eficaz. El OIEA es donde tiene lugar la mayor parte de esa cooperación. Nuestros Estados Miembros aprobaron el *Plan de Acción del OIEA sobre Seguridad Nuclear* pocos meses después del accidente y están aplicando sus disposiciones de largo alcance para mejorar la seguridad nuclear mundial.

El OIEA, que prestó apoyo técnico y aportó conocimientos especializados al Japón después del accidente y facilitó al mundo información sobre la crisis conforme se iba desarrollando, ha revisado y mejorado sus disposiciones para responder a una emergencia nuclear. Se ha ampliado nuestra función durante una emergencia nuclear, que ahora abarca también el suministro de análisis de sus posibles consecuencias y la exposición de posibles escenarios de cómo podría evolucionar una crisis.

Las normas de seguridad del OIEA encarnan un consenso internacional acerca de lo que constituye un alto nivel de seguridad. Después del accidente, la Comisión sobre Normas de Seguridad las revisó y se propusieron y aprobaron algunos cambios. Aliento a todos los países a aplicar plenamente las normas de seguridad del OIEA.

Los exámenes por homólogos del OIEA desempeñan una función esencial en la seguridad nuclear mundial, pues permiten a los países beneficiarse de las opiniones independientes de destacados expertos internacionales, sobre la base del marco de referencia común de las normas de seguridad del OIEA. En esos exámenes se abordan cuestiones como la seguridad operacional de las centrales nucleares, la eficacia de los reguladores nucleares y el diseño de los emplazamientos de las centrales nucleares habida cuenta de sus riesgos específicos. Hemos reforzado nuestro programa de examen por homólogos desde el accidente y seguiremos haciéndolo.

Estoy seguro de que el legado del accidente de Fukushima Daiichi será una mayor concentración en la seguridad nuclear en todas partes. He visto mejoras en las medidas y los procedimientos de seguridad de todas las centrales nucleares que he visitado. Hay un reconocimiento generalizado de que se debe hacer todo lo humanamente posible para que no vuelva a suceder nunca más un accidente semejante. Esto es tanto más esencial cuanto que es probable que en los próximos decenios siga aumentando la utilización de la energía nucleoelectrica.

No puede haber motivo para conformarse con la situación de la seguridad nuclear en ningún país. Algunos de los factores que contribuyeron al accidente de Fukushima Daiichi no eran propios del Japón. El cuestionamiento permanente y la actitud abierta a extraer enseñanzas de la experiencia son fundamentales para la cultura de la seguridad y esenciales para todos quienes intervienen en la generación de energía nucleoelectrica. La seguridad debe ir siempre en primer lugar.

Doy las gracias a los expertos de muchos países y organizaciones internacionales que han hecho aportaciones al presente informe, y a mis colegas del OIEA que lo han redactado y revisado. Espero que el presente informe, y los volúmenes técnicos que lo acompañan, resulten valiosos a todos los países que utilizan o tienen previsto utilizar la energía nucleoelectrica en sus esfuerzos permanentes por mejorar la seguridad.

AGRADECIMIENTOS

El Canadá, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, el Japón y el Reino Unido proporcionaron asistencia financiera.

Se recibieron contribuciones en especie de Alemania, la Argentina, Australia, Belarús, el Brasil, el Canadá, China, Cuba, los Emiratos Árabes Unidos, Eslovaquia, España, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Filipinas, Finlandia, Francia, Ghana, la India, Indonesia, Islandia, Israel, Italia, el Japón, Malasia, Marruecos, México, Noruega, Nueva Zelandia, los Países Bajos, el Pakistán, Polonia, el Reino Unido, la República Árabe Siria, la República Checa, la República de Corea, la República Unida de Tanzania, Sudáfrica, Suecia, Suiza, Turquía y Ucrania. Se recibieron también contribuciones en especie de la Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE, la Asociación Mundial de Operadores Nucleares, la Comisión Europea, la Comisión Internacional de Protección Radiológica, el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas, el Grupo Internacional de Seguridad Nuclear, la Organización Internacional del Trabajo, la Organización Meteorológica Mundial y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

El Gobierno del Japón prestó una asistencia inestimable al facilitar una cantidad considerable de información, disponer lo necesario para que los expertos japoneses respaldaran los trabajos relacionados con el informe, y asegurar el apoyo logístico a las reuniones bilaterales celebradas en el Japón.

El Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas proporcionó apoyo al OIEA dándole acceso a la base de datos de las referencias de su informe de 2013 y autorizando la reproducción de la información y las figuras de ese informe.

El OIEA da las gracias al gran número de expertos que participaron en la preparación del presente informe. Este documento es fruto de la dedicación de muchas personas. Todos los participantes que se enumeran al final de este resumen hicieron aportaciones valiosas, pero una parte especialmente grande del trabajo recayó en los copresidentes y los coordinadores de subtemas de los grupos de trabajo. Se agradece asimismo sinceramente la labor del gran número de expertos que examinaron los textos, incluida la de los miembros del Grupo Técnico Asesor Internacional.

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO	1
INFORME RESUMIDO.....	21
1. INTRODUCCIÓN.....	21
1.1. EL INFORME SOBRE EL ACCIDENTE DE FUKUSHIMA DAIICHI	22
2. EL ACCIDENTE Y SU EVALUACIÓN.....	25
2.1. DESCRIPCIÓN DEL ACCIDENTE.....	25
2.1.1. Suceso iniciador y respuesta	25
2.1.2. Progresión del accidente	35
2.1.3. Esfuerzos de estabilización.....	48
2.2. CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD NUCLEAR.....	52
2.2.1. Vulnerabilidad de la central a sucesos externos.....	52
2.2.2. Aplicación del concepto de defensa en profundidad.....	56
2.2.3. Evaluación de la incapacidad de cumplir las funciones de seguridad fundamentales.....	59
2.2.4. Evaluación de los accidentes que sobrepasan la base de diseño y gestión de los accidentes	64
2.2.5. Evaluación de la eficacia reguladora	68
2.2.6. Evaluación de los factores humanos y organizativos.....	73
2.3. OBSERVACIONES Y LECCIONES APRENDIDAS	76
3. PREPARACIÓN Y RESPUESTA EN SITUACIONES DE EMERGENCIA.....	80
3.1. RESPUESTA INICIAL AL ACCIDENTE EN EL JAPÓN.....	81
3.1.1. Notificación	82
3.1.2. Medidas de mitigación.....	83
3.1.3. Gestión de la emergencia.....	85
3.2. PROTECCIÓN DE LOS TRABAJADORES DE EMERGENCIAS	87
3.2.1. Protección del personal de la central después del terremoto y el tsunami	88
3.2.2. Medidas de protección de los trabajadores de emergencias.....	88
3.2.3. Designación de los trabajadores de emergencias	89
3.2.4. Manejo médico de los trabajadores de emergencias	90
3.3. PROTECCIÓN DE LA POBLACIÓN.....	90
3.3.1. Medidas protectoras urgentes y reubicación de la población.....	91
3.3.2. Medidas protectoras relacionadas con los alimentos, el agua potable y la agricultura	95
3.3.3. Información pública	97
3.3.4. Comercio internacional.....	98
3.3.5. Gestión de los desechos en la fase de emergencia	98
3.4. TRANSICIÓN DE LA FASE DE EMERGENCIA A LA FASE DE RECUPERACIÓN Y ANÁLISIS DE LA RESPUESTA	99
3.4.1. Transición de la fase de emergencia a la fase de recuperación	99
3.4.2. Análisis de la respuesta.....	100
3.5. RESPUESTA DENTRO DEL MARCO INTERNACIONAL PARA LA PREPARACIÓN Y RESPUESTA EN SITUACIONES DE EMERGENCIA	101
3.6. OBSERVACIONES Y LECCIONES APRENDIDAS	103

4.	CONSECUENCIAS RADIOLÓGICAS	107
4.1.	RADIOACTIVIDAD EN EL MEDIO AMBIENTE.....	113
4.1.1.	Emisiones.....	114
4.1.2.	Dispersión.....	114
4.1.3.	Deposición.....	118
4.1.4.	Productos de consumo	119
4.2.	PROTECCIÓN DE LAS PERSONAS CONTRA LA EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN	123
4.2.1.	Restricción de la exposición de la población.....	123
4.2.2.	Restricción de la exposición ocupacional, incluida la de los trabajadores de emergencias	126
4.3.	EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN	127
4.3.1.	Exposición de la población.....	129
4.3.2.	Exposición ocupacional.....	134
4.4.	EFFECTOS EN LA SALUD.....	138
4.4.1.	Efectos tempranos de la radiación en la salud	139
4.4.2.	Posibles efectos tardíos de la radiación en la salud.....	140
4.4.3.	Efectos de la radiación en los niños.....	141
4.4.4.	Efectos prenatales causados por la radiación.....	142
4.4.5.	Consecuencias psicológicas.....	142
4.5.	CONSECUENCIAS RADIOLÓGICAS PARA LA BIOTA NO HUMANA.....	144
4.6.	OBSERVACIONES Y LECCIONES APRENDIDAS	145
5.	RECUPERACIÓN DESPUÉS DEL ACCIDENTE.....	149
5.1.	RESTAURACIÓN DE ZONAS AFECTADAS POR EL ACCIDENTE FUERA DEL EMPLAZAMIENTO.....	149
5.1.1.	Establecimiento de un marco jurídico y regulador para la restauración	150
5.1.2.	Estrategia de restauración adoptada.....	151
5.1.3.	Progresos en la restauración.....	152
5.2.	ESTABILIZACIÓN EN EL EMPLAZAMIENTO Y PREPARATIVOS PARA LA CLAUSURA ..	156
5.2.1.	Plan estratégico	157
5.2.2.	Preparativos para la clausura	157
5.2.3.	Gestión del agua contaminada	158
5.2.4.	Retirada del combustible gastado y de los restos de combustible.....	161
5.2.5.	Estado final de clausura del emplazamiento	162
5.3.	GESTIÓN DEL MATERIAL CONTAMINADO Y LOS DESECHOS RADIATIVOS.....	163
5.3.1.	Gestión de los desechos	163
5.3.2.	Actividades fuera del emplazamiento	164
5.3.3.	Actividades en el emplazamiento	167
5.4.	REVITALIZACIÓN DE LAS COMUNIDADES Y PARTICIPACIÓN DE LOS INTERESADOS .	168
5.4.1.	Consecuencias socioeconómicas.....	169
5.4.2.	Revitalización	170
5.4.3.	Participación de las partes interesadas y comunicación con ellas.....	170
5.5.	OBSERVACIONES Y LECCIONES APRENDIDAS	171
6.	RESPUESTA DEL OIEA AL ACCIDENTE.....	175
6.1.	ACTIVIDADES DEL OIEA	175
6.1.1.	Actividades iniciales.....	175
6.1.2.	Misiones del OIEA al Japón	177
6.1.3.	Conferencia Ministerial del OIEA sobre Seguridad Nuclear.....	177

6.1.4.	Plan de Acción del OIEA sobre Seguridad Nuclear	179
6.1.5.	Cooperación con la prefectura de Fukushima	179
6.1.6.	Conferencia Ministerial de Fukushima sobre Seguridad Nuclear	181
6.2.	REUNIONES DE LAS PARTES CONTRATANTES EN LA CONVENCION SOBRE SEGURIDAD NUCLEAR	181
6.2.1.	Reunión Extraordinaria de las Partes Contratantes en la Convención sobre Seguridad Nuclear	181
6.2.2.	Sexta Reunión de Examen de las Partes Contratantes en la Convención sobre Seguridad Nuclear	182
6.2.3.	Conferencia Diplomática y Declaración de Viena sobre la Seguridad Nuclear	183
	REFERENCIAS	184
	LISTA DE ABREVIATURAS	202
	COLABORADORES EN LA REDACCIÓN Y REVISIÓN	204
	GRUPO TÉCNICO ASESOR INTERNACIONAL	215
	REUNIONES	216
	DERECHOS DE AUTOR	218
	NOTA EDITORIAL	219

EL ACCIDENTE DE FUKUSHIMA DAIICHI

RESUMEN EJECUTIVO

El gran terremoto del Japón oriental tuvo lugar el 11 de marzo de 2011. Fue causado por una liberación súbita de energía en la superficie de contacto de la placa tectónica del Pacífico con la placa tectónica Norteamericana, bajo la cual se sumerge. Una sección de la corteza terrestre, de unos 500 km de longitud y 200 km de ancho, según las estimaciones, se fracturó y provocó un terremoto masivo de magnitud 9,0 y un tsunami que afectó a una amplia zona costera del Japón, incluida la costa nororiental, donde varias olas superaron los 10 metros de altura. El terremoto y el tsunami causaron muchas muertes y gran devastación en el Japón. Más de 15 000 personas perdieron la vida, más de 6000 quedaron heridas y, cuando se redactó el presente informe¹, alrededor de 2500 aún estaban desaparecidas. Los edificios y la infraestructura sufrieron daños considerables, particularmente a lo largo de la costa nororiental del Japón.

En la central nuclear de Fukushima Daiichi, explotada por la Compañía de Energía Eléctrica de Tokio (TEPCO), el terremoto causó daños al tendido del suministro eléctrico exterior y el tsunami provocó una destrucción sustancial de la infraestructura operacional y de seguridad del emplazamiento. El efecto combinado fue la pérdida de la alimentación eléctrica dentro y fuera del emplazamiento. Ello privó de la función de refrigeración a los tres reactores que estaban en funcionamiento², así como a las piscinas de combustible gastado. Las otras cuatro centrales nucleares³ situadas a lo largo de la costa también se vieron afectadas por el terremoto y el tsunami en diferentes grados. Sin embargo, todos los reactores que estaban en funcionamiento en esas centrales pararon de forma segura.

Pese a los esfuerzos de los operadores de la central nuclear de Fukushima Daiichi por mantener el control, los núcleos de los reactores de las Unidades 1 a 3 se sobrecalentaron, el combustible nuclear se fundió y las tres vasijas de contención se fracturaron. El hidrógeno que escapó de las vasijas a presión de los reactores provocó explosiones en los edificios de los reactores de las Unidades 1, 3 y 4, causando daños a las estructuras y el equipo y lesiones al personal. La central dejó escapar radionucleidos a la atmósfera, que se depositaron en la tierra y el océano. También hubo emisiones directas al mar.

Los habitantes de 20 km a la redonda y de otras zonas designadas fueron evacuados, y los que se encontraban en un radio de entre 20 y 30 km recibieron primero la instrucción de permanecer en espacios interiores, y más tarde el consejo de evacuar la zona voluntariamente. Se impusieron restricciones a la distribución y el consumo de alimentos y al consumo de agua potable. Cuando se elaboró el presente informe, muchas personas aún no habían regresado a las zonas de las que habían sido evacuadas.

Una vez estabilizadas las condiciones de los reactores de la central nuclear de Fukushima Daiichi⁴, se iniciaron los trabajos para preparar su clausura. Los esfuerzos para la recuperación de las zonas afectadas por el accidente, incluida la restauración y revitalización de las comunidades y la infraestructura, comenzaron en 2011.

¹ Marzo de 2015. En algunos casos se ha incluido la información disponible hasta junio de 2015, cuando ha sido posible.

² De las seis unidades de la central nuclear de Fukushima Daiichi, la 1, la 2 y la 3 estaban funcionando en el momento del accidente; las Unidades 4, 5 y 6 estaban en una parada programada.

³ Las centrales nucleares de Higashidori, Onagawa, Fukushima Daini y Tokai Daini.

⁴ El 16 de diciembre de 2011, la Oficina de Respuesta Integrada Gobierno-TEPCO anunció que en las Unidades 1 a 3 se habían alcanzado las condiciones del 'estado de parada fría'. La expresión 'estado de parada fría' fue definida en ese momento por el Gobierno del Japón específicamente para la central nuclear de Fukushima Daiichi. Esa definición difiere de la terminología empleada por el OIEA y por otros.

En el período inmediatamente posterior al accidente, el OIEA desempeñó su función de respuesta a emergencias. Activó su Sistema de Respuesta a Incidentes y Emergencias, coordinó la respuesta interinstitucional, e inició una serie de sesiones informativas con los Estados Miembros y los medios de comunicación.

El Director General visitó el Japón inmediatamente y el OIEA envió varias misiones a ese país, comprendida una misión de investigación internacional y misiones de examen por homólogos sobre la clausura y la restauración.

El OIEA organizó una Conferencia Ministerial Internacional sobre Seguridad Nuclear en junio de 2011, que culminó en una Declaración Ministerial sobre Seguridad Nuclear. En la Declaración se señalaron varias medidas para mejorar aún más la seguridad nuclear, la preparación para emergencias y la protección radiológica de las personas y el medio ambiente en todo el mundo. También se expresó el firme compromiso de los Estados Miembros del OIEA de velar por que esas medidas se llevaran a efecto.

En la Declaración Ministerial se solicitó asimismo al Director General que preparara un proyecto de Plan de Acción del OIEA sobre Seguridad Nuclear (el Plan de Acción)⁵, en consulta con los Estados Miembros. El Plan de Acción, que definía un programa de trabajo para fortalecer el marco mundial de seguridad nuclear, fue aprobado por unanimidad por la quincuagésima quinta reunión ordinaria de la Conferencia General del OIEA en 2011.

El OIEA también inició actividades cooperativas en Fukushima por medio de un memorando de cooperación entre el OIEA y la prefectura de Fukushima, que sentó la base de la cooperación en materia de monitorización radiológica y restauración, salud humana, y preparación y respuesta en situaciones de emergencia.

El OIEA también facilitó y organizó una serie de conferencias y reuniones internacionales de sus Estados Miembros y de las Partes Contratantes en la Convención sobre Seguridad Nuclear. Muchas de estas actividades se celebraron en el marco del Plan de Acción.

Desde el accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi, Estados Miembros del OIEA y organizaciones internacionales, así como Estados parte en instrumentos sobre seguridad nuclear, en particular la Convención sobre Seguridad Nuclear, han realizado muchos análisis de las causas y En agosto de 2012 se celebró una reunión extraordinaria de las Partes Contratantes en la Convención sobre Seguridad Nuclear para examinar y debatir los análisis iniciales del accidente y la eficacia de la Convención.

Las Partes Contratantes en la Convención sobre Seguridad Nuclear que participaron en la Sexta Reunión de Examen, celebrada en marzo-abril de 2014, informaron sobre la aplicación de mejoras de la seguridad, tales como: la introducción de medios adicionales para soportar una pérdida prolongada de energía eléctrica y de refrigeración; la mejora de los sistemas de suministro de electricidad para aumentar la fiabilidad; la reevaluación de los peligros naturales externos en cada emplazamiento y de los sucesos que podían afectar a varias unidades; el mejoramiento de los centros de control de emergencias dentro y fuera de los emplazamientos para asegurar la protección contra los sucesos externos extremos y los peligros radiológicos; el fortalecimiento de las medidas para preservar la integridad de la contención; y la mejora de las disposiciones y directrices para la gestión de accidentes severos.

⁵ El Plan de Acción definió un programa de trabajo para reforzar el marco mundial de seguridad nuclear. El Plan de Acción consta de 12 medidas principales, que se relacionan con: las evaluaciones de la seguridad; los exámenes por homólogos del OIEA; la preparación y respuesta en situaciones de emergencia; los órganos reguladores nacionales; las entidades explotadoras; las normas de seguridad del OIEA; el marco jurídico internacional; los Estados Miembros que están planificando iniciar un programa nucleoelectrico; la creación de capacidad; la protección de las personas y el medio ambiente contra la radiación ionizante; la comunicación y la difusión de información; y la investigación y el desarrollo. En la sección 6.1 figura información más detallada.

En febrero de 2015, las Partes Contratantes en la Convención sobre Seguridad Nuclear, en una Conferencia Diplomática convocada por el Director General del OIEA, aprobaron la Declaración de Viena sobre la Seguridad Nuclear, en que se exponen los principios para la aplicación del tercer objetivo de la Convención, que es prevenir los accidentes con consecuencias radiológicas y mitigar tales consecuencias, en caso de que se produzcan.

EL INFORME SOBRE EL ACCIDENTE DE FUKUSHIMA DAIICHI

En la Conferencia General del OIEA celebrada en septiembre de 2012, el Director General anunció que el OIEA prepararía un informe sobre el accidente de Fukushima Daiichi. Más tarde afirmó que dicho informe sería “una evaluación autorizada, realista y equilibrada, que abordaría las causas y consecuencias del accidente, así como las enseñanzas extraídas”.

El informe sobre el accidente de Fukushima Daiichi es fruto de una extensa labor de colaboración internacional en que participaron cinco grupos de trabajo, integrados por unos 180 expertos procedentes de 42 Estados Miembros (con y sin programas de energía nucleoelectrica) y varios órganos internacionales. Esto permitió contar con un amplio abanico de experiencias y conocimientos. Un Grupo Técnico Asesor Internacional proporcionó asesoramiento sobre cuestiones técnicas y científicas. Se estableció un Grupo Central, integrado por altos funcionarios del OIEA, para que dirigiera los trabajos y facilitara la coordinación y el examen del informe. También se establecieron otros mecanismos de examen interno y externo.

El presente Informe del Director General consiste en un Resumen ejecutivo y un Informe resumido. Se basa en cinco volúmenes técnicos detallados preparados por expertos internacionales y en las contribuciones de los numerosos expertos y órganos internacionales que participaron en su elaboración. El informe proporciona una descripción del accidente y de sus causas, su evolución y sus consecuencias, sobre la base de la evaluación de los datos y la información obtenidos de un gran número de fuentes hasta marzo de 2015, incluidos los resultados del trabajo realizado para aplicar el Plan de Acción, y destaca las principales observaciones y lecciones aprendidas. El Gobierno del Japón y otras organizaciones del país proporcionaron grandes cantidades de datos.

CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD NUCLEAR

Vulnerabilidad de la central a sucesos externos

El terremoto del 11 de marzo de 2011 causó un movimiento vibratorio de la tierra que sacudió las estructuras, los sistemas y los componentes de la central. Le siguieron una serie de olas de tsunami, una de las cuales inundó el emplazamiento. Tanto los movimientos de la tierra registrados como las alturas de las olas del tsunami excedieron considerablemente de los supuestos relativos a los peligros que se habían postulado al diseñar la central. El terremoto y el tsunami conexo afectaron a múltiples unidades de la central nuclear de Fukushima Daiichi.

En el diseño originario, el peligro sísmico y las olas de tsunami considerados se habían evaluado principalmente sobre la base de los registros sísmicos históricos y de los datos sobre tsunamis recientes en el Japón. En esta evaluación originaria no se tuvieron suficientemente en cuenta los criterios tectónico-geológicos y no se realizó ninguna reevaluación de dichos criterios.

Antes del terremoto, la Fosa de Japón estaba clasificada como una zona de subducción con frecuentes terremotos de magnitud 8; los científicos japoneses no consideraban creíble que se pudiera producir un terremoto de magnitud 9,0 frente a la costa de la prefectura de Fukushima. Sin embargo, en diferentes zonas con entornos tectónicos parecidos se habían registrado terremotos de magnitudes de ese orden o superiores en los decenios precedentes.

No hubo ninguna indicación de que las principales características de seguridad de la central se vieran afectadas por los movimientos vibratorios de la tierra generados por el terremoto del 11 de marzo de 2011. Ello se debió al enfoque prudente aplicado en el Japón con respecto a los terremotos al diseñar y construir centrales nucleares, lo que dio lugar a una central con márgenes de seguridad suficientes. No obstante, las consideraciones del diseño originario no preveían márgenes de seguridad comparables para sucesos de inundación externa extremos, como los tsunamis.

La vulnerabilidad de la central nuclear de Fukushima Daiichi a los peligros externos no se había revaluado de manera sistemática y completa en sus años de existencia. En la época del accidente no existían en el Japón requisitos reglamentarios a ese respecto, y los reglamentos y directrices vigentes no tenían adecuadamente en cuenta la experiencia operativa pertinente a nivel nacional e internacional. Las directrices reglamentarias en el Japón sobre los métodos para hacer frente a los efectos de los sucesos asociados con los terremotos, como los tsunamis, eran genéricas y breves y no proporcionaban criterios específicos u orientación detallada.

Antes del accidente, la entidad explotadora había realizado algunas revaluaciones de los niveles de inundación que podía provocar un tsunami extremo, utilizando una metodología basada en el consenso que se había desarrollado en el Japón en 2002, y había obtenido valores más altos que las estimaciones empleadas inicialmente como base de diseño. En vista de ello, se habían adoptado algunas medidas compensatorias, pero estas demostraron ser insuficientes cuando se produjo el accidente.

Además, antes del accidente la entidad explotadora había realizado varios cálculos de pruebas utilizando modelos de fuentes de ondas o metodologías que iban más allá de la metodología basada en el consenso. Así, un cálculo de prueba con un modelo de fuente propuesto por la Oficina Central de Promoción de la Investigación sobre los Terremotos del Japón en 2002, que utilizaba la información más reciente y un enfoque diferente en sus escenarios, había previsto un tsunami considerablemente mayor que el postulado en el diseño inicial y en las estimaciones hechas en las revaluaciones posteriores. En la época del accidente se estaban llevando a cabo nuevas evaluaciones, pero entretanto no se había aplicado ninguna medida compensatoria adicional. Los valores estimados eran similares a los niveles de inundación que se registraron en marzo de 2011.

En la experiencia operativa mundial se han observado casos en los que los peligros naturales han sobrepasado la base de diseño para una central nuclear. En particular, la experiencia adquirida de algunos de esos sucesos demostró la vulnerabilidad de los sistemas de seguridad a las inundaciones.

- **La evaluación de los peligros naturales debe ser suficientemente prudente. La consideración de datos principalmente históricos al establecer la base de diseño de las centrales nucleares no es suficiente para caracterizar los riesgos de los peligros naturales extremos. Incluso cuando se dispone de amplios datos, el hecho de que los períodos de observación sean relativamente breves hace que la predicción de los peligros naturales esté sujeta a grandes incertidumbres.**
- **La seguridad de las centrales nucleares debe reevaluarse periódicamente para tener en cuenta los adelantos en los conocimientos, y las medidas correctivas o compensatorias necesarias deben adoptarse con prontitud.**
- **En la evaluación de los peligros naturales se deben tener en cuenta las posibilidades de que estos ocurran de forma combinada, ya sea simultánea o secuencialmente, y sus efectos combinados en una central nuclear. En esa evaluación se deben tener en cuenta también los efectos en distintas unidades de una central nuclear.**
- **Los programas de experiencia operativa deben incluir la experiencia de fuentes nacionales e internacionales. Las mejoras de la seguridad definidas por medio de esos programas deben aplicarse sin demora. Es preciso evaluar de forma periódica e independiente el uso de la experiencia operativa.**

Aplicación del concepto de defensa en profundidad

La defensa en profundidad es un concepto que se aplica para garantizar la seguridad de las instalaciones nucleares desde el comienzo del desarrollo de la energía nucleoelectrónica. Su objetivo es contrarrestar los posibles fallos humanos y del equipo mediante varios niveles de protección. Múltiples medios independientes proporcionan esta defensa en cada nivel de protección.

En el diseño de la central nuclear de Fukushima Daiichi se habían considerado el equipo y los sistemas para los tres primeros niveles de defensa en profundidad: 1) el equipo destinado a asegurar un funcionamiento normal fiable; 2) el equipo destinado a restablecer las condiciones de seguridad en la central después de un suceso anormal; y 3) los sistemas de seguridad destinados a hacer frente a condiciones de accidente. Las bases de diseño se derivaron empleando una serie de peligros postulados; sin embargo, los peligros externos tales como los tsunamis no se habían tenido plenamente en cuenta. En consecuencia, la inundación resultante del tsunami afectó simultáneamente a los tres primeros niveles de protección de la defensa en profundidad, lo que provocó fallos de causa común de los equipos y los sistemas en cada uno de los tres niveles.

Los fallos de causa común de múltiples sistemas de seguridad crearon en la central unas condiciones que no se habían previsto en el diseño. Por consiguiente, los medios de protección destinados a proporcionar el cuarto nivel de la defensa en profundidad, es decir, la prevención de la progresión de los accidentes severos y la mitigación de sus consecuencias, no estuvieron disponibles para restablecer la refrigeración de los reactores ni mantener la integridad de la contención. La pérdida completa de la energía eléctrica, la falta de información sobre los parámetros de seguridad pertinentes debido a la no disponibilidad de los instrumentos necesarios, la pérdida de los dispositivos de control y la insuficiencia de los procedimientos de operación imposibilitaron el despliegue de las disposiciones para detener la progresión del accidente y limitar sus consecuencias.

Al no disponer de suficientes medios de protección en cada nivel de la defensa en profundidad, se produjeron daños severos en los reactores de las Unidades 1, 2 y 3, con emisiones radiactivas importantes desde esas unidades.

- **El concepto de la defensa en profundidad sigue siendo válido, pero su aplicación debe reforzarse en todos los niveles mediante una adecuada independencia, redundancia, diversidad y protección contra los peligros internos y externos. Es preciso centrarse no solo en la prevención de los accidentes, sino también en la mejora de las medidas de mitigación.**
- **Los sistemas de instrumentación y control que sean necesarios durante los accidentes que sobrepasen la base de diseño tienen que mantenerse en condiciones de funcionar a fin de monitorizar los parámetros esenciales de la seguridad de la central y facilitar las operaciones en la planta.**

Evaluación de la incapacidad de cumplir las funciones de seguridad fundamentales

Las tres funciones de seguridad fundamentales para mantener la seguridad son: el control de la reactividad en el combustible nuclear; la evacuación del calor del núcleo del reactor y de la piscina de combustible gastado; y el confinamiento del material radiactivo. Después del terremoto, la primera función de seguridad fundamental —el control de la reactividad— se cumplió en las seis unidades de la central nuclear de Fukushima Daiichi.

La segunda función de seguridad fundamental —la evacuación del calor del núcleo del reactor y de la piscina de combustible gastado— no se pudo mantener porque los operadores estuvieron privados de casi todos los medios de control de los reactores de las Unidades 1, 2 y 3, así como de las piscinas de combustible gastado, como resultado de la pérdida de la mayoría de los sistemas eléctricos de corriente alterna y continua. La pérdida de la segunda función de seguridad fundamental se debió, en parte, a la imposibilidad de realizar una inyección de agua por otros medios a causa de los retrasos en la despresurización de las vasijas de presión de los reactores. La pérdida de la refrigeración condujo al sobrecalentamiento y la fusión del combustible en los reactores.

La función de confinamiento se perdió como consecuencia del corte de la alimentación de corriente alterna y continua, que inutilizó los sistemas de refrigeración y dificultó el empleo por los operadores del sistema de venteo de la contención. El venteo era necesario para aliviar la presión e impedir el fallo de la contención. Los operadores lograron ventear las Unidades 1 y 3 para reducir la presión en las vasijas de contención primaria, pero esto supuso la generación de emisiones radiactivas al medio ambiente. Aunque se abrieron las válvulas de venteo de la contención para las Unidades 1 y 3, las vasijas de contención primaria de esas unidades acabaron fallando. En el caso de la Unidad 2, no se logró ventear la contención y esta falló, lo que causó emisiones radiactivas.

- **Deben establecerse sistemas de refrigeración robustos y fiables para la evacuación del calor residual, que puedan funcionar tanto en las condiciones previstas en la base de diseño como en las que sobrepasen esa base.**
- **Debe asegurarse una función de confinamiento fiable para los accidentes que sobrepasen la base de diseño, a fin de evitar una emisión importante de material radiactivo al medio ambiente.**

Evaluación de los accidentes que sobrepasan la base de diseño y gestión de los accidentes

Los análisis de seguridad realizados durante el proceso de concesión de la licencia para la central nuclear de Fukushima Daiichi y durante su funcionamiento no abordaron plenamente la posibilidad de que se produjera una secuencia compleja de sucesos que pudiera conducir a un daño severo del núcleo del reactor. En particular, los análisis de seguridad no determinaron la vulnerabilidad de la central a las inundaciones, ni los puntos débiles de los procedimientos operativos y las directrices para la gestión de accidentes. Las evaluaciones probabilistas de la seguridad no incluyeron la posibilidad de una inundación interna, y los supuestos relativos a la actuación humana para la gestión de los accidentes eran optimistas. Además, los requisitos impuestos por el órgano regulador para que las entidades explotadoras tuvieran en cuenta la posibilidad de que se produjeran accidentes severos eran limitados.

Los operadores no estaban plenamente preparados para la pérdida del suministro eléctrico en múltiples unidades y la pérdida de la refrigeración causada por el tsunami. Aunque la TEPCO había elaborado directrices para la gestión de accidentes severos, estas directrices no abarcaban esta combinación improbable de sucesos. Así pues, los operadores no habían recibido la capacitación adecuada, ni habían participado en ejercicios pertinentes de simulación de accidentes severos, y el equipo de que disponían no era apropiado en las condiciones degradadas de la central.

En septiembre de 2012 se estableció la Autoridad de Reglamentación Nuclear (ARN). La ARN formuló nueva reglamentación para las centrales nucleares con el fin de proteger a las personas y el medio ambiente. Esa reglamentación, que entró en vigor en 2013, reforzó las contramedidas para prevenir la pérdida simultánea de todas las funciones de seguridad debido a una causa común, incluida la revaluación de los efectos de sucesos externos tales como terremotos y tsunamis. También se introdujeron contramedidas nuevas en la respuesta a accidentes severos para evitar el daño al núcleo y a la vasija de contención y la difusión de material radiactivo.

- **Deben realizarse análisis de seguridad probabilistas y deterministas completos para confirmar la capacidad de una planta de soportar los accidentes fuera de la base de diseño que correspondan, y para establecer un alto grado de confianza en la robustez del diseño de la central.**
- **Las disposiciones para la gestión de accidentes deben ser amplias y estar bien diseñadas y actualizadas. Deben derivarse a partir de un conjunto completo de sucesos iniciadores y condiciones de la central, y también deben prever accidentes que afecten a varias unidades de una central con múltiples reactores.**
- **La capacitación, los ejercicios y los simulacros deben incluir las condiciones postuladas para un accidente severo a fin de asegurarse de que los operadores estén preparados lo mejor posible. Ello debe comprender el uso simulado del equipo real que se desplegaría en la gestión de un accidente severo.**

Evaluación de la eficacia reguladora

En la época del accidente, la regulación de la seguridad nuclear en el Japón corría a cargo de varias organizaciones con diferentes funciones y responsabilidades y con interrelaciones complejas. No estaba totalmente claro cuáles de ellas tenían la responsabilidad y la autoridad de emitir instrucciones vinculantes sobre cómo responder sin demora a las cuestiones de seguridad.

El programa de inspecciones reglamentarias tenía una estructura rígida, que reducía la capacidad del órgano regulador de verificar la seguridad en los momentos debidos y de detectar las posibles cuestiones nuevas de seguridad.

Los reglamentos, directrices y procedimientos existentes en la época del accidente no eran plenamente acordes con la práctica internacional en algunas áreas clave, especialmente en lo relativo a los exámenes periódicos de la seguridad, la reevaluación de los peligros, la gestión de los accidentes severos y la cultura de la seguridad.

- **Para lograr una supervisión reglamentaria eficaz de la seguridad de las instalaciones nucleares, es esencial que el órgano regulador sea independiente y posea autoridad legal, competencia técnica y una sólida cultura de la seguridad.**

Evaluación de los factores humanos y organizativos

Antes del accidente se daba por supuesto en el Japón que el diseño de las centrales nucleares, y las medidas de seguridad que se habían establecido, eran suficientemente robustos para resistir a los sucesos externos de baja probabilidad y grandes consecuencias.

Debido al supuesto básico de que las centrales nucleares del Japón eran seguras, las organizaciones y su personal tendían a no poner en duda el nivel de seguridad. Ese supuesto básico reforzado entre las partes interesadas de que el diseño técnico de las centrales nucleares era robusto creó una situación en que no se introducían mejoras de la seguridad con la debida prontitud.

El accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi demostró que, para determinar mejor las vulnerabilidades de una central, es necesario adoptar un enfoque integrado que tenga en cuenta las complejas interacciones de las personas, las organizaciones y la tecnología.

- **A fin de promover y reforzar la cultura de la seguridad, las personas y organizaciones deben cuestionar o reexaminar continuamente los supuestos reinantes con respecto a la seguridad nuclear, y las consecuencias de las decisiones y medidas que puedan repercutir en ella.**
- **En un enfoque sistémico de la seguridad deben tomarse en consideración las interacciones de los factores humanos, organizativos y técnicos. Este enfoque debe adoptarse durante todo el ciclo de vida de las instalaciones nucleares.**

PREPARACIÓN Y RESPUESTA EN SITUACIONES DE EMERGENCIA

Respuesta inicial al accidente en el Japón

En la época del accidente, había disposiciones separadas para responder a las emergencias nucleares y a los desastres naturales a nivel nacional y local. No existían disposiciones coordinadas para responder a una emergencia nuclear y un desastre natural que se produjeran simultáneamente.

Las disposiciones de respuesta a las emergencias nucleares preveían que, cuando se detectaran determinadas condiciones adversas en una central nuclear (por ejemplo, la interrupción de todo el suministro eléctrico de corriente alterna durante más de cinco minutos o la pérdida total de la capacidad de refrigerar el reactor), se enviaría una notificación a la administración local y al gobierno

nacional. El gobierno nacional evaluaría entonces la situación y determinaría si debía clasificarse como una ‘emergencia nuclear’.⁶ Si la situación se clasificaba como emergencia nuclear, se emitiría una declaración a ese efecto a nivel nacional y se adoptarían decisiones respecto de las medidas protectoras necesarias, sobre la base de las dosis proyectadas.

Basándose en un informe recibido de la central nuclear de Fukushima Daiichi, al final de la tarde del 11 de marzo el Primer Ministro declaró una emergencia nuclear y ordenó la adopción de medidas para proteger a la población. La respuesta a nivel nacional fue dirigida por el Primer Ministro y por altos funcionarios de la Oficina del Primer Ministro en Tokio.

Las consecuencias del terremoto y del tsunami y el aumento de los niveles de radiación dificultaron enormemente la respuesta en el emplazamiento. Debido a la pérdida del suministro de corriente alterna y continua, a la presencia de grandes cantidades de escombros que entorpecían las medidas de respuesta en el emplazamiento, a las réplicas y las alertas de nuevos tsunamis y al aumento de los niveles de radiación, muchas medidas de mitigación no se pudieron aplicar en el momento debido. El Gobierno nacional participó en las decisiones sobre la adopción de medidas de mitigación en el emplazamiento.

Los extensos daños a la infraestructura causados por el terremoto y el tsunami dificultaron la activación del Centro Externo para emergencias, situado fuera del emplazamiento, a 5 km de la central nuclear de Fukushima Daiichi. Pocos días después, las condiciones radiológicas adversas obligaron a evacuar el Centro Externo.

- **En la preparación para responder a una posible emergencia nuclear es necesario tener en cuenta las emergencias que puedan entrañar un daño severo del combustible nuclear del núcleo del reactor o del combustible gastado presente en el emplazamiento, incluidas las que afecten a varias unidades de una central con múltiples reactores y que puedan producirse en coincidencia con un desastre natural.**
- **El sistema de gestión de emergencias para responder a una emergencia nuclear debe incluir una clara definición de las funciones y responsabilidades de la entidad explotadora y de las autoridades locales y nacionales. El sistema, incluidas las interacciones de la organización explotadora con las autoridades, debe ponerse a prueba mediante ejercicios periódicos.**

Protección de los trabajadores de emergencias

En la época del accidente, la legislación y las orientaciones nacionales del Japón se referían a las medidas que había que adoptar para proteger a los trabajadores de emergencias, pero solo en términos generales y sin suficientes detalles.

Se precisaron muchos trabajadores de emergencias, con diferentes profesiones, para prestar apoyo en la respuesta a la emergencia. Llegaron trabajadores de emergencias de diversas organizaciones y servicios públicos. Sin embargo, no había disposiciones para integrar en la respuesta a los trabajadores de emergencias que no habían sido designados antes del accidente.

La aplicación de las disposiciones para asegurar la protección de los trabajadores contra la exposición a la radiación se vio gravemente afectada por las condiciones extremas imperantes en el emplazamiento. Para mantener un nivel aceptable de protección de los trabajadores de emergencias en el emplazamiento, se aplicaron una serie de medidas improvisadas. El límite de dosis de los trabajadores de emergencias que estaban realizando determinadas tareas se elevó temporalmente para

⁶ Ley de Medidas Especiales relativas a la Preparación para Emergencias Nucleares, Ley N° 156 de 1999, en su versión enmendada más recientemente por la Ley N° 118 de 2006, denominada en adelante Ley de Emergencias Nucleares.

que pudiera proseguir la aplicación de las medidas de mitigación necesarias. El manejo médico de los trabajadores de emergencias también se vio gravemente afectado, y hubo que realizar grandes esfuerzos para atender las necesidades de esos trabajadores en el emplazamiento.

Para la respuesta de emergencia fuera del emplazamiento se contó con la asistencia voluntaria de miembros de la población, los denominados ‘ayudantes’. Las autoridades nacionales publicaron orientaciones sobre el tipo de actividades que podían llevar a cabo los ayudantes y sobre las medidas que había que adoptar para protegerlos.

- **Los trabajadores de emergencias deben estar designados de antemano, con una clara especificación de sus funciones, independientemente de la organización para la que trabajen, y deben recibir una capacitación adecuada y la debida protección durante la emergencia. Deben existir disposiciones para integrar en la respuesta a los trabajadores de emergencias que no hayan sido designados con anterioridad a la emergencia, y a los ayudantes que presten asistencia voluntaria en la respuesta a esta.**

Protección de la población

Según las disposiciones nacionales para situaciones de emergencia vigentes en la época del accidente, las decisiones relativas a las medidas protectoras se basarían en estimaciones de la dosis proyectada que recibiría la población, que se calcularían cuando fuera necesario adoptar una decisión sirviéndose de un modelo de proyección de dosis, el Sistema de Predicción de Información sobre Dosis Ambientales en Emergencias (SPEEDI). Las disposiciones no preveían que las decisiones sobre las medidas protectoras urgentes para salvaguardar a la población se basaran en la existencia de condiciones específicas predefinidas en la central. Sin embargo, en la respuesta al accidente, las decisiones iniciales relativas a las medidas protectoras se adoptaron sobre la base de las condiciones imperantes en la central. La pérdida del suministro eléctrico en el emplazamiento impidió la introducción de las estimaciones del término fuente en el sistema SPEEDI.

Las disposiciones vigentes antes del accidente incluían criterios para la emisión de la orden de permanecer en espacios interiores, la evacuación y el bloqueo de la tiroides con yodo expresados en términos de dosis proyectadas, pero no de cantidades mensurables. No había criterios para la reubicación de la población.

Las medidas adoptadas para proteger a la población durante el accidente incluyeron la evacuación, la orden de permanecer en espacios interiores, el bloqueo de la tiroides con yodo (mediante la administración de yodo estable), la imposición de restricciones al consumo de alimentos y agua potable, la reubicación y el suministro de información.

La evacuación de la población de las inmediaciones de la central nuclear de Fukushima Daiichi comenzó al final de la tarde del 11 de marzo de 2011, ampliándose progresivamente la zona de evacuación de un radio de 2 km alrededor de la central a 3 km y luego a 10 km. Al atardecer del 12 de marzo, el radio se había aumentado a 20 km. Del mismo modo, la zona en que se ordenó a la población que permaneciera en espacios interiores pasó gradualmente de los 3 a 10 km de distancia de la central fijados poco después del accidente al radio de 20 a 30 km establecido el 15 de marzo. En la zona comprendida dentro del radio de 20 a 30 km de la central nuclear rigió la orden de permanecer en espacios interiores hasta el 25 de marzo, cuando el Gobierno nacional recomendó la evacuación voluntaria. La administración de yodo estable para bloquear la tiroides no se aplicó de manera uniforme, principalmente por falta de disposiciones pormenorizadas.

Hubo dificultades para realizar la evacuación, debido a los daños causados por el terremoto y el tsunami y a los problemas de comunicación y transporte consiguientes. También hubo grandes dificultades para evacuar a los pacientes de los hospitales y las residencias de ancianos situados dentro de la zona de evacuación de 20 km.

El 22 de abril, la zona de evacuación de 20 km fue clasificada como ‘Zona de Acceso Restringido’, con control del reingreso. Asimismo, fuera de la ‘Zona de Acceso Restringido’ se estableció una ‘Zona de Evacuación Deliberada’ en los lugares donde podían superarse los criterios de dosis específicos para la reubicación de la población.

Cuando se detectaron radionucleidos en el medio ambiente, se adoptaron disposiciones para proteger la zona agrícola e imponer restricciones al consumo y la distribución de alimentos y al consumo de agua potable. Además, se estableció un sistema de certificación de alimentos y de otros productos destinados a la exportación.

Para mantener informada a la población y responder a sus inquietudes durante la emergencia se utilizaron varios canales, como la televisión, la radio, Internet y líneas telefónicas directas. La retroinformación aportada por la población a través de las líneas telefónicas directas y los servicios de asesoramiento indicó la necesidad de proporcionar información y material de apoyo de fácil comprensión.

- **Deben existir disposiciones que permitan adoptar decisiones sobre la aplicación de las medidas protectoras urgentes previamente determinadas para salvaguardar a la población, sobre la base de la existencia en la central de condiciones que se hayan definido con anterioridad.**
- **Deben existir disposiciones que permitan ampliar o modificar las medidas protectoras urgentes en respuesta a la evolución de las condiciones en la central o a los resultados de la monitorización. También se precisan disposiciones que permitan adoptar medidas protectoras tempranas sobre la base de los resultados de la monitorización.**
- **Deben establecerse disposiciones para velar por que las medidas protectoras y otras medidas de respuesta adoptadas en una emergencia nuclear reporten más beneficios que daños. Para lograr ese equilibrio se requiere un enfoque integral de la adopción de decisiones.**
- **Deben existir disposiciones para ayudar a los responsables de las decisiones, al público y a otras personas (por ejemplo, al personal médico) a comprender los peligros radiológicos para la salud que se dan en una emergencia nuclear, a fin de que adopten decisiones fundamentadas con respecto a las medidas protectoras. Asimismo, debe contarse con disposiciones para responder a las preocupaciones de la población a escala local, nacional e internacional.**

Transición de la fase de emergencia a la fase de recuperación y análisis de la respuesta

Las políticas, directrices, criterios y disposiciones específicos para la transición de la fase de emergencia a la fase de recuperación no se elaboraron hasta después del accidente de Fukushima Daiichi. Al formular esas disposiciones, las autoridades del Japón decidieron aplicar las recomendaciones más recientes de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP).

Se llevaron a cabo análisis del accidente y de la respuesta a la emergencia, que se presentaron como informes, publicados, entre otros, por el Gobierno del Japón, la entidad explotadora (TEPCO) y dos comités de investigación creados por el Gobierno y el Parlamento, respectivamente.

Después del accidente, muchas de las disposiciones nacionales del Japón para la preparación y respuesta en situaciones de emergencia se revisaron para tener en cuenta las conclusiones de esos análisis y las normas de seguridad del OIEA pertinentes en lo que respecta a la preparación y respuesta en situaciones de emergencia.

- **En la fase de preparación deben elaborarse disposiciones para la terminación de las medidas protectoras y de otras medidas de respuesta y para la transición a la fase de recuperación.**
- **Un análisis oportuno de las emergencias y de las medidas adoptadas en respuesta a ellas, en que se extraigan enseñanzas y se determinen las mejoras posibles, fortalece las disposiciones de emergencia.**

Respuesta dentro del marco internacional para la preparación y respuesta en situaciones de emergencia

En la época del accidente existía un amplio marco internacional para la preparación y respuesta en situaciones de emergencia, compuesto por instrumentos jurídicos internacionales, normas de seguridad del OIEA y disposiciones operacionales.⁷

El OIEA tenía entonces cuatro funciones en la respuesta a una emergencia nuclear o radiológica: 1) la notificación y el intercambio de información oficial a través de puntos de contacto designados oficialmente; 2) el suministro de información oportuna, clara y comprensible; 3) la prestación de asistencia internacional y su facilitación, cuando así se solicitara; y 4) la coordinación de la respuesta interinstitucional.

En la respuesta internacional al accidente participaron muchos Estados y varias organizaciones internacionales.

El OIEA permaneció en comunicación con el punto de contacto oficial en el Japón, difundió información sobre la evolución de la emergencia, y mantuvo informados a los Estados, las organizaciones internacionales pertinentes y el público. La comunicación con el punto de contacto oficial en el Japón fue difícil en la primera fase de la respuesta a la emergencia. Con la visita al Japón del Director General del OIEA y el posterior despliegue de oficiales de enlace en Tokio, mejoró la comunicación entre el OIEA y el punto de contacto. El OIEA envió también misiones de expertos al Japón y coordinó la respuesta interinstitucional.

Los distintos Estados⁸ adoptaron o recomendaron medidas protectoras diferentes para sus nacionales que se encontraban en el Japón en respuesta al accidente. En general, las diferencias no se explicaron bien a la población, y en algunos casos ocasionaron confusión e inquietud.

Las organizaciones pertinentes que integran el Comité Interinstitucional sobre Emergencias Radiológicas y Nucleares intercambiaron regularmente información. También se publicaron comunicados de prensa conjuntos.

- **Debe reforzarse la aplicación de las disposiciones internacionales sobre la notificación y la asistencia.**
- **Deben mejorarse las consultas y el intercambio de información entre los Estados sobre las medidas protectoras y otras medidas de respuesta.**

CONSECUENCIAS RADIOLÓGICAS

Radiactividad en el medio ambiente

El accidente dio lugar a la emisión de radionucleidos al medio ambiente. Muchas organizaciones hicieron evaluaciones de las emisiones empleando diferentes modelos. La mayor parte de las emisiones a la atmósfera fueron transportadas hacia el este por los vientos dominantes, depositándose

⁷ Los principales instrumentos jurídicos internacionales son la Convención sobre la Pronta Notificación de Accidentes Nucleares y la Convención sobre Asistencia en Caso de Accidente Nuclear o Emergencia Radiológica. En la época del accidente, las normas de seguridad internacionales en la esfera de la preparación y respuesta en situaciones de emergencia eran las de las publicaciones N^{os} GS-R-2 y GS-G-2.1 de la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA*. La publicación N^o 115 de la *Colección Seguridad* también incluía elementos relacionados con la preparación y respuesta en situaciones de emergencia. Las disposiciones operacionales internacionales abarcaban el Manual sobre operaciones técnicas para la notificación y asistencia en situaciones de emergencia (ENATOM), la Red de Respuesta y Asistencia (RANET) del OIEA y el Plan Conjunto de las Organizaciones Internacionales para la Gestión de Emergencias Radiológicas (Plan Conjunto).

⁸ El Estado es el principal responsable de la preparación y respuesta ante una emergencia nuclear o radiológica, así como de la protección de la vida y la salud humanas, los bienes y el medio ambiente.

en el océano Pacífico Norte y dispersándose dentro de él. Las incertidumbres en las estimaciones de la cantidad y la composición de las sustancias radiactivas fueron difíciles de resolver, entre otras cosas por la falta de datos de monitorización de la deposición de las emisiones atmosféricas en el océano.

Los cambios en la dirección del viento hicieron que una parte relativamente pequeña de las emisiones atmosféricas se depositara en la tierra, principalmente hacia el noroeste de la central nuclear de Fukushima Daiichi. La presencia y la actividad de los radionucleidos depositados en el medio ambiente terrestre se monitorizaron y caracterizaron. La actividad medida de los radionucleidos se reduce con el paso del tiempo debido a los procesos de desintegración física y transporte medioambiental, así como a las actividades de limpieza.

Además de los radionucleidos que entraron en el océano por deposición atmosférica, hubo emisiones líquidas y descargas desde la central nuclear de Fukushima Daiichi directamente al mar frente al emplazamiento. El desplazamiento preciso de los radionucleidos en el océano es difícil de determinar solo con mediciones, pero se han utilizado varios modelos de transporte oceánico para estimar la dispersión oceánica.

Algunos radionucleidos emitidos, como el yodo 131, el cesio 134 y el cesio 137, fueron encontrados en el agua potable, en alimentos y en algunos productos no comestibles. En respuesta al accidente, las autoridades japonesas establecieron restricciones para evitar el consumo de estos productos.

— **En caso de emisión accidental de sustancias radiactivas al medio ambiente, es preciso cuantificar y caracterizar sin demora la cantidad y composición de la emisión. Cuando se trata de emisiones importantes, se requiere un programa amplio y coordinado de monitorización ambiental a largo plazo para determinar la naturaleza y el alcance de los efectos radiológicos en el medio ambiente a nivel local, regional y mundial.**

Protección de las personas contra la exposición a la radiación

Después del accidente, las autoridades japonesas aplicaron los niveles de referencia de las dosis prudentes que figuraban en las recomendaciones de la ICRP recientes⁹. La aplicación de algunas de las acciones y medidas de protección resultó difícil para las autoridades competentes y muy problemática para las personas afectadas.

Hubo algunas diferencias entre los criterios y orientaciones nacionales e internacionales para el control del agua potable, los alimentos y los productos de consumo no comestibles a plazo más largo después del accidente, una vez terminada la fase de emergencia.

— **Los órganos internacionales competentes deben elaborar explicaciones de los principios y criterios de la protección radiológica que sean comprensibles para los no especialistas, a fin de aclarar su aplicación a los responsables de la adopción de decisiones y a la población. Puesto que algunas medidas de protección que se prolongaron en el tiempo tuvieron un efecto perturbador en las personas afectadas, se necesita una mejor estrategia de comunicación para dar a conocer la justificación de esas medidas y acciones a todos los interesados, incluida la población.**

⁹ La ICRP publica recomendaciones internacionales sobre la protección radiológica. Estas recomendaciones se tienen en cuenta al preparar las normas de seguridad internacionales, incluidas las normas de protección radiológica (las Normas Básicas Internacionales de Seguridad para la Protección Contra la Radiación Ionizante y para la Seguridad de las Fuentes de Radiación (las Normas Básicas de Seguridad o NBS)) elaboradas y establecidas por varias organizaciones internacionales, que se han publicado bajo los auspicios del OIEA. Las NBS se utilizan en todo el mundo al elaborar las reglamentaciones nacionales para la protección de las personas y del medio ambiente contra los posibles efectos nocivos de la exposición a la radiación ionizante. Las recomendaciones de la ICRP de 2007 proporcionaron un marco revisado para la protección radiológica. Esas recomendaciones incluían el establecimiento de niveles de referencia para las estrategias de protección. En el momento del accidente las NBS estaban en revisión, entre otras cosas para incorporar esas recomendaciones.

- **Las decisiones prudentes en relación con la actividad específica y las concentraciones de actividad en los productos de consumo y la actividad de la deposición dieron lugar a amplias restricciones, con las consiguientes dificultades. En una situación de exposición prolongada, es ventajosa la coherencia entre las normas internacionales, y entre las normas internacionales y nacionales, en particular las relativas al agua potable, los alimentos, los productos de consumo no comestibles y la actividad de la deposición en la tierra.**

Exposición a la radiación

A corto plazo, los factores más importantes que contribuyeron a la exposición de la población fueron: 1) la exposición externa causada por los radionucleidos presentes en el penacho y depositados en la tierra; y 2) la exposición interna de la glándula tiroides, debida a la incorporación de yodo 131, y la exposición interna de otros órganos y tejidos, causada principalmente por la incorporación de cesio 134 y cesio 137. A largo plazo, el contribuyente más importante a la exposición de la población será la radiación externa emitida por el cesio 137 depositado.

Las primeras evaluaciones de las dosis de radiación se basaron en la monitorización del medio ambiente y en modelos de estimación de las dosis, y en parte dieron valores sobreestimados. En las estimaciones del presente informe se han incluido también los datos de monitorización individual facilitados por las autoridades locales para ofrecer una información más robusta sobre las dosis individuales reales que se recibieron y su distribución. Estas estimaciones indican que las dosis efectivas que recibieron los miembros de la población fueron bajas, comparables en general con el rango de dosis efectivas causadas por los niveles mundiales de radiación natural de fondo.

Después de un accidente nuclear en que hay emisiones de yodo 131 y este es incorporado por los niños, su absorción y las dosis que se acumulan en la glándula tiroides son motivos de particular preocupación. Tras el accidente de Fukushima Daiichi, las dosis equivalentes en la glándula tiroides de los niños sobre las que se informó fueron bajas, porque su incorporación de yodo 131 fue limitada, gracias en parte a las restricciones impuestas al consumo de agua potable y alimentos, incluidas las hortalizas de hoja y la leche fresca. Hay incertidumbres con respecto a las incorporaciones de yodo inmediatamente después del accidente, debido a la escasez de datos fiables de monitorización radiológica individual para ese período.

Al mes de diciembre de 2011, habían participado en las operaciones de emergencia alrededor de 23 000 trabajadores de emergencias. Las dosis efectivas de radiación que había recibido la mayoría de ellos estaban por debajo de los límites de dosis ocupacionales vigentes en el Japón. De esas personas, 174 superaban el criterio inicial para los trabajadores de emergencias, y 6 superaban el criterio revisado temporalmente por la autoridad japonesa para la dosis efectiva en una emergencia. Hubo algunas deficiencias en la aplicación de los requisitos de protección radiológica ocupacional, por ejemplo en la monitorización y el registro de las dosis de radiación recibidas por los trabajadores de emergencias en el primer período, en la disponibilidad y utilización de algunos equipos de protección y en la capacitación conexas.

- **La monitorización radiológica individual de grupos representativos de la población proporciona información muy valiosa para obtener estimaciones fiables de las dosis de radiación, y debe utilizarse conjuntamente con mediciones ambientales y modelos adecuados de estimación de dosis para evaluar la dosis recibida por la población.**
- **Si bien los productos lácteos no fueron la principal vía de ingestión de yodo radiactivo en el Japón, está claro que el modo más importante de limitar las dosis recibidas por la tiroides, especialmente en el caso de los niños, es restringir el consumo de leche fresca de vacas en pastoreo.**
- **Se necesita un sistema robusto de monitorización y registro de las dosis de radiación ocupacionales, por todas las vías pertinentes, especialmente las ocasionadas por la exposición interna en que puedan haber incurrido los trabajadores durante las actividades**

de gestión de un accidente severo. Es esencial que se disponga de equipo de protección individual adecuado y suficiente para limitar la exposición de los trabajadores durante las actividades de respuesta a una emergencia, y que los trabajadores estén suficientemente capacitados en el uso de ese equipo.

Efectos en la salud

No se observó ningún efecto temprano de la radiación en la salud de los trabajadores o de los miembros de la población que pudiera atribuirse al accidente.

El tiempo de latencia de los efectos tardíos de la radiación en la salud puede ser de decenios, por lo que no es posible descartar, mediante observaciones hechas pocos años después de la exposición, que esos efectos se produzcan en algún momento en la población expuesta. Sin embargo, dados los bajos niveles de dosis notificados con respecto a la población, las conclusiones del presente informe concuerdan con las comunicadas por el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) a la Asamblea General de las Naciones Unidas.¹⁰ El UNSCEAR determinó que “no se prevé un aumento discernible de la incidencia de efectos en la salud relacionados con la radiación entre la población general expuesta y su descendencia” (señalada en el contexto de las repercusiones en la salud relacionadas con los “niveles y efectos de la exposición a la radiación debida al accidente nuclear tras el sismo y tsunami de gran magnitud ocurridos en la zona oriental del Japón en 2011”).¹¹ Con respecto al grupo de trabajadores que recibieron dosis efectivas de 100 mSv o superiores, el UNSCEAR concluyó que “cabría esperar un mayor riesgo de cáncer en el futuro. Sin embargo, no se prevé un aumento perceptible de la incidencia de cáncer en ese grupo a causa de la dificultad de confirmar una incidencia tan reducida en comparación con las fluctuaciones estadísticas normales de la incidencia de cáncer”.¹²

El Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima se emprendió para monitorizar la salud de la población afectada de la prefectura de Fukushima. Este estudio tiene por objeto detectar y tratar precozmente las enfermedades, y también prevenir las enfermedades relacionadas con el modo de vida. Mientras se prepara el presente informe, está en curso una exploración intensiva de la glándula tiroides de los niños en el marco de ese estudio. Se está empleando equipo de alta sensibilidad, que ha detectado anomalías asintomáticas de la tiroides (que no se habrían detectado por medios clínicos) en un número importante de niños examinados. Es poco probable que las anomalías encontradas en el estudio estén asociadas con la exposición a la radiación causada por el accidente; lo más probable es que denoten la prevalencia normal de anomalías de la tiroides en los niños de esa edad. El cáncer de tiroides en los niños es el efecto en la salud más probable tras un accidente con emisiones importantes de yodo radiactivo. Como las dosis en la tiroides atribuibles al accidente que se comunicaron fueron bajas en general, es poco probable que se produzca un aumento del cáncer de tiroides infantil atribuible al accidente. Sin embargo, persisten incertidumbres con respecto a las dosis equivalentes en la tiroides recibidas por los niños inmediatamente después del accidente.

No se han observado efectos prenatales de la radiación y no se prevé que se produzcan, dado que las dosis notificadas son muy inferiores a los umbrales a los que pueden generarse esos efectos. No se han notificado abortos no deseados atribuibles a la situación radiológica. En cuanto a la posibilidad de que la exposición de los padres tenga efectos hereditarios en sus descendientes, el UNSCEAR

¹⁰ UNITED NATIONS, Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, A/68/46, UN, New York (2013).

¹¹ La Organización Mundial de la Salud (OMS) también publicó una evaluación de los riesgos para la salud en 2013 sobre la base de las dosis estimadas preliminares. Los resultados se presentan en este informe.

¹² Véase la nota 10.

concluyó que, en general, “[s]i bien se ha demostrado un aumento de la incidencia de los efectos hereditarios en estudios hechos con animales, en los seres humanos por el momento esos efectos no pueden atribuirse a la exposición a radiaciones”.¹³

Se informó de algunos trastornos psicológicos entre la población afectada por el accidente nuclear. Puesto que esas personas sufrieron los efectos combinados de un gran terremoto y un tsunami devastador, junto con el accidente, es difícil determinar en qué medida esos efectos podrían atribuirse al accidente nuclear por sí solo. El Estudio sobre la Salud Mental y el Modo de Vida, efectuado en el marco del Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima, revela la existencia de problemas psicológicos relacionados con lo ocurrido en algunos grupos vulnerables de la población afectada, por ejemplo aumentos de la ansiedad y trastornos de estrés postraumático. El UNSCEAR estimó que “[e]l efecto más importante [del accidente] desde el punto de vista de la salud es el que se produce en el bienestar mental y social y que guarda relación con el enorme impacto del sismo, el tsunami y el accidente nuclear, y el temor y el estigma relacionados con el riesgo percibido de exposición a la radiación ionizante”.¹⁴

- **Los riesgos de la exposición a la radiación y la atribución a la radiación de los efectos observados en la salud tienen que explicarse claramente a las partes interesadas, señalando de manera inequívoca que los aumentos en la incidencia de efectos en la salud en la población no son atribuibles a la exposición a la radiación, si los niveles de esta son similares a los niveles globales medios de fondo de la radiación.**
- **Los estudios sobre la salud realizados después de un accidente nuclear son muy importantes y útiles, pero no deben interpretarse como estudios epidemiológicos. Los resultados de esos estudios sobre la salud tienen por objeto proporcionar información para respaldar la prestación de asistencia médica a la población afectada.**
- **Se necesita orientación sobre la protección radiológica para hacer frente a las consecuencias psicológicas en los miembros de las poblaciones afectadas después de un accidente radiológico. Un grupo de tareas de la ICRP ha recomendado que se elaboren estrategias para mitigar las graves consecuencias psicológicas derivadas de los accidentes radiológicos.**¹⁵
- **Debe comunicarse información objetiva, comprensible y oportuna sobre los efectos de la radiación a las personas de las zonas afectadas, para aumentar su entendimiento de las estrategias de protección, aliviar sus preocupaciones y apoyar sus propias iniciativas de protección.**

Consecuencias radiológicas para la biota no humana

No se han comunicado observaciones de efectos directos en las plantas y los animales provocados por la radiación, aunque se realizaron estudios observacionales limitados en el período inmediatamente posterior al accidente. Hay limitaciones en las metodologías disponibles para evaluar las consecuencias radiológicas, pero, teniendo en cuenta la experiencia anterior y los niveles de radionucleidos presentes en el medio ambiente, es improbable que se registren consecuencias radiológicas importantes para las poblaciones de la biota o los ecosistemas como consecuencia del accidente.

¹³ UNITED NATIONS, Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, A/67/46, UN, New York (2012).

¹⁴ UNITED NATIONS, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2013 Report, Vol. I, Scientific Annex A: Levels and Effects of Radiation Exposure Due to the Nuclear Accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2014).

¹⁵ INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Report of ICRP Task Group 84 on Initial Lessons Learned from the Nuclear Power Plant Accident in Japan vis-à-vis the ICRP System of Radiological Protection, ICRP, Ottawa (2012).

- **Durante la fase de emergencia la atención debe centrarse en proteger a las personas. Las dosis recibidas por la biota no se pueden controlar, y podrían ser importantes a nivel individual. El conocimiento de las repercusiones de la exposición a la radiación en la biota no humana debe fortalecerse mejorando la metodología de evaluación y la comprensión de los efectos que la radiación provoca en las poblaciones de la biota y los ecosistemas. Después de una emisión grande de radionucleidos al medio ambiente, debe adoptarse una perspectiva integrada para asegurar la sostenibilidad de la agricultura, la silvicultura, la pesca y el turismo, así como el uso de los recursos naturales.**

RECUPERACIÓN DESPUÉS DEL ACCIDENTE

Restauración de zonas afectadas por el accidente fuera del emplazamiento

El objetivo a largo plazo de la recuperación después de un accidente¹⁶ es restablecer una base aceptable para que pueda existir una sociedad que funcione plenamente en las zonas afectadas. Es preciso tomar en consideración la restauración¹⁷ de las zonas afectadas por el accidente a fin de reducir las dosis de radiación, de acuerdo con los niveles de referencia que se hayan adoptado. En la preparación para el regreso de los evacuados conviene tener en cuenta factores como la reparación de la infraestructura, así como la viabilidad y sostenibilidad de las actividades económicas de la comunidad.

Antes del accidente de Fukushima Daiichi no existían en el Japón políticas ni estrategias para la restauración después de un accidente y hubo que elaborarlas en el período posterior al accidente. La política de restauración fue promulgada por el Gobierno del Japón en agosto de 2011.¹⁸ Por ella se asignaron responsabilidades al gobierno nacional y las administraciones locales, el explotador y la población, y se establecieron las disposiciones institucionales necesarias para ejecutar un programa coordinado de trabajo.

Se elaboró una estrategia de restauración y se inició su implementación. La estrategia específica que las zonas prioritarias de restauración son las zonas residenciales, incluidos los edificios y jardines, las tierras de labranza, las carreteras y la infraestructura, con especial hincapié en la reducción de las exposiciones externas.

La dosis externa recibida de los radionucleidos depositados en el suelo y otras superficies es la principal vía de exposición. Por consiguiente, la estrategia de restauración se centra en las actividades de descontaminación destinadas a reducir los niveles de cesio radiactivo presente en las zonas prioritarias, reduciendo así las posibilidades de que se diera esa exposición. Las dosis internas se siguen controlando por medio de las restricciones al consumo de alimentos, así como de las actividades de restauración de las tierras agrícolas.

Después del accidente, las autoridades japonesas adoptaron un ‘nivel de referencia’ como objetivo del nivel de dosis aplicable a toda la estrategia de restauración. Este nivel se correspondía con el extremo inferior del rango especificado en la orientación internacional. La aplicación de un nivel de referencia bajo

¹⁶ La recuperación después de un accidente incluye: la restauración de las zonas afectadas por el accidente; la estabilización de las instalaciones dañadas del emplazamiento y los preparativos para la clausura; la gestión del material contaminado y de los desechos radiactivos derivados de esas actividades; y la revitalización de las comunidades y la participación de los interesados.

¹⁷ La restauración se define como cualquier medida que se pueda poner en práctica para reducir la *exposición a la radiación* ocasionada por la *contaminación* existente de superficies terrestres mediante la aplicación de medidas a la propia *contaminación* (la *fuentes*) o a las *vías de exposición* para los seres humanos.

¹⁸ Ley de Medidas Especiales sobre el Manejo de la Contaminación Ambiental por Materiales Radiactivos Descargados en el Accidente de la Central Nuclear asociado con el Terremoto del Océano Pacífico frente al Distrito de Tohoku del 11 de Marzo de 2011, Ley N° 110, 2011.

se traduce en una mayor cantidad de materiales contaminados generados en las actividades de restauración, lo que supone un aumento de los costos y de la carga para unos recursos que son limitados. La experiencia adquirida en el Japón se podría utilizar para elaborar orientación práctica sobre la aplicación de normas de seguridad internacionales en situaciones de recuperación después de un accidente.

Se definieron dos categorías de zonas contaminadas a partir de las dosis anuales adicionales estimadas en el otoño de 2011. Se asignó al Gobierno nacional la responsabilidad de formular e implementar los planes de restauración en la primera zona (la ‘Zona Especial de Descontaminación’), en un radio de 20 km alrededor del emplazamiento de Fukushima Daiichi y en las zonas en que, según las proyecciones, las dosis anuales adicionales derivadas de la contaminación sobre el suelo superarían los 20 mSv en el primer año después del accidente. Los municipios fueron encargados de llevar a cabo actividades de restauración en la otra zona (la ‘Zona de Estudio Intensivo de la Contaminación’), en la que, según las proyecciones, las dosis anuales adicionales superarían 1 mSv pero se mantendrían por debajo de 20 mSv. Se fijaron metas específicas de reducción de las dosis, así como la meta a largo plazo de alcanzar una dosis anual adicional de 1 mSv o menos.

- **La planificación antes de un accidente para la recuperación después de este es necesaria para mejorar la toma de decisiones bajo presión en la situación inmediatamente posterior al accidente. Es preciso preparar con antelación las estrategias y medidas nacionales para la recuperación después del accidente a fin de poder poner en marcha un programa de recuperación general eficaz y apropiado si se produce un accidente nuclear. Esas estrategias y medidas deben incluir el establecimiento de un marco jurídico y regulador; estrategias y criterios de restauración genéricos para las dosis de radiación residuales y los niveles de contaminación; un plan de estabilización y clausura de las instalaciones nucleares dañadas; y una estrategia genérica de gestión de grandes cantidades de material contaminado y desechos radiactivos.**
- **Las estrategias de restauración deben tener en cuenta la eficacia y viabilidad de las distintas medidas y la cantidad de material contaminado que se generará en el proceso de restauración.**
- **Como parte de la estrategia de restauración, es necesario aplicar pruebas y controles rigurosos de los alimentos para prevenir o reducir al mínimo las dosis por ingestión.**
- **Se precisa más orientación internacional sobre la aplicación práctica de las normas de seguridad relativas a la protección radiológica en situaciones de recuperación después de un accidente.**

Estabilización en el emplazamiento y preparativos para la clausura

La TEPCO y los organismos competentes del Gobierno del Japón elaboraron conjuntamente un plan estratégico amplio de alto nivel para la estabilización y clausura de la central nuclear dañada. Ese plan se publicó por primera vez en diciembre de 2011 y posteriormente se revisó a fin de tener en cuenta la experiencia adquirida y el mejor conocimiento de las condiciones de la central nuclear dañada, así como la magnitud de los desafíos futuros. El plan estratégico aborda la naturaleza compleja de los trabajos en el emplazamiento y comprende: el enfoque para garantizar la seguridad; las medidas para la clausura; los sistemas y entornos destinados a facilitar las actividades; y las necesidades en materia de investigación y desarrollo.

Cuando se redactó el presente informe se habían restablecido las funciones de seguridad y se disponía de estructuras, sistemas y componentes para mantener condiciones estables de forma fiable. No obstante, seguía siendo necesario controlar la entrada de agua subterránea a los edificios de los reactores dañados y contaminados. El agua contaminada resultante se estaba sometiendo a tratamiento para extraer los radionucleidos en la medida de lo posible y estaba almacenada en más de 800 depósitos. Se necesitan soluciones más sostenibles que tengan en cuenta todas las opciones, comprendida la posible reanudación de la descarga controlada en el mar. Para adoptar decisiones definitivas será necesario contar con la participación de los interesados pertinentes y tener en cuenta las condiciones socioeconómicas en el proceso de consulta, así como aplicar un programa de monitorización amplio.

Se elaboraron planes para la gestión del combustible gastado y los restos de combustible y comenzó la retirada de combustible de las piscinas de combustible gastado.¹⁹ Se elaboró un modelo conceptual de las actividades futuras de retirada de restos de combustible en el que se tienen en cuenta los muchos pasos preliminares requeridos, incluida la confirmación visual de la configuración y composición de esos restos. Debido a los altos niveles de dosis de radiación en los reactores dañados, en el momento de redactar el presente informe aún no había sido posible dar esa confirmación.

Las autoridades japonesas han estimado que el plazo para finalizar las actividades de clausura probablemente será de unos 30 a 40 años. Las decisiones acerca de las condiciones finales de la central y el emplazamiento serán objeto de más análisis y debates.

- **Tras un accidente, es esencial para la recuperación en el emplazamiento disponer de un plan estratégico destinado a mantener las condiciones estables a largo plazo y a clausurar las instalaciones dañadas en el accidente. El plan debe ser flexible y fácilmente adaptable a las condiciones cambiantes y a nuevas informaciones.**
- **La recuperación del combustible dañado y la caracterización y retirada de los restos de combustible precisan soluciones concebidas específicamente para el accidente, y quizás sea necesario desarrollar métodos e instrumentos especiales.**

Gestión del material contaminado y los desechos radiactivos

La estabilización de una central nuclear dañada y las actividades de descontaminación en el emplazamiento y de restauración en los alrededores dan lugar a grandes cantidades de material contaminado y de desechos radiactivos. En el emplazamiento se han generado grandes cantidades de material líquido y sólido contaminado, así como desechos radiactivos, a raíz de diversas actividades de recuperación.²⁰ La gestión de este material —con sus diversas propiedades físicas, químicas y radiológicas— es compleja y requiere el despliegue de esfuerzos importantes.

Tras el accidente de Fukushima Daiichi, hubo dificultades para determinar lugares en los que almacenar las grandes cantidades de material contaminado generadas por las actividades de restauración fuera del emplazamiento. Cuando se redactó el presente informe se habían construido varios cientos de instalaciones de almacenamiento temporal en las comunidades locales y proseguían los esfuerzos para construir una instalación de almacenamiento provisional.

- **Las estrategias y medidas nacionales de recuperación después de un accidente deben incluir la elaboración de una estrategia genérica de gestión del material líquido y sólido contaminado y los desechos radiactivos, respaldadas por evaluaciones genéricas de la seguridad para la descarga, el almacenamiento y la disposición final.**

Revitalización de las comunidades y participación de los interesados

El accidente nuclear y las medidas de protección radiológica introducidas tanto en la fase de emergencia como en la de recuperación después del accidente han tenido consecuencias importantes para la forma de vida de la población afectada. Las medidas de evacuación y reubicación y las restricciones al consumo de alimentos supusieron grandes privaciones para las personas afectadas. Los proyectos de revitalización y reconstrucción iniciados en la prefectura de Fukushima se basaron en la comprensión de las consecuencias socioeconómicas del accidente. Estos proyectos se centran en cuestiones como la reconstrucción de la infraestructura, la revitalización de las comunidades y el apoyo y la indemnización.

¹⁹ La retirada del combustible de la piscina de combustible gastado de la Unidad 4 finalizó en diciembre de 2014.

²⁰ La distinción entre el material contaminado y los desechos radiactivos depende de los radionucleidos y las concentraciones de actividad asociados con los materiales.

La comunicación con la población acerca de las actividades de recuperación es esencial para crear confianza. A fin de comunicar de forma eficaz, es necesario que los expertos entiendan las necesidades de información de la población afectada y faciliten información comprensible a través de medios pertinentes. La comunicación mejoró después del accidente, y la población afectada fue participando cada vez más en la adopción de decisiones y en las medidas de restauración.

- **Es necesario reconocer las consecuencias socioeconómicas de cualquier accidente nuclear y de las medidas protectoras posteriores, y desarrollar proyectos de revitalización y reconstrucción que aborden cuestiones como la reconstrucción de la infraestructura, la revitalización de las comunidades y la indemnización.**
- **El apoyo de las partes interesadas es esencial en todos los aspectos de la recuperación después del accidente. En particular, en los procesos de adopción de decisiones se precisa la participación de la población afectada para que la recuperación tenga éxito y sea aceptable y eficaz, y para revitalizar las comunidades. Un programa de recuperación eficaz requiere la confianza y la participación de la población afectada. Se debe crear confianza en la aplicación de las medidas de recuperación mediante procesos de diálogo, el suministro de información coherente, clara y oportuna, y la prestación de apoyo a la población afectada.**

EL ACCIDENTE DE FUKUSHIMA DAIICHI

INFORME RESUMIDO

1. INTRODUCCIÓN

El gran terremoto del Japón oriental tuvo lugar el 11 de marzo de 2011. Fue causado por una liberación súbita de energía en la superficie de contacto de la placa tectónica del Pacífico con la placa tectónica Norteamericana, bajo la cual se sumerge. Una sección de la corteza terrestre, de unos 500 km de longitud y 200 km de ancho, según las estimaciones, se fracturó y provocó un terremoto masivo de magnitud 9,0 y un tsunami que afectó a una amplia zona costera del Japón, incluida la costa nororiental, donde varias olas superaron los 10 metros de altura. El terremoto y el tsunami causaron muchas muertes y gran devastación en el Japón. Más de 15 000 personas perdieron la vida, más de 6000 quedaron heridas y, cuando se redactó el presente informe²¹, alrededor de 2500 aún estaban desaparecidas [1]. Los edificios y la infraestructura sufrieron daños considerables, particularmente a lo largo de la costa nororiental del Japón.

En la central nuclear de Fukushima Daiichi, explotada por la Compañía de Energía Eléctrica de Tokio (TEPCO), el terremoto causó daños al tendido del suministro eléctrico exterior y el tsunami provocó una destrucción sustancial de la infraestructura operacional y de seguridad del emplazamiento. El efecto combinado fue la pérdida de la alimentación eléctrica dentro y fuera del emplazamiento. Ello privó de la función de refrigeración a los tres reactores que estaban en funcionamiento²², así como a las piscinas de combustible gastado. Las otras cuatro centrales²³ situadas a lo largo de la costa también se vieron afectadas por el terremoto y el tsunami en diferentes grados. Sin embargo, todos los reactores que estaban en funcionamiento en esas centrales pararon de forma segura.

Pese a los esfuerzos de los operadores de la central nuclear de Fukushima Daiichi por mantener el control, los núcleos de los reactores de las Unidades 1 a 3 se sobrecalentaron, el combustible nuclear se fundió y las tres vasijas de contención se fracturaron. El hidrógeno que escapó de las vasijas a presión de los reactores provocó explosiones en los edificios de los reactores de las Unidades 1, 3 y 4, causando daños a las estructuras y el equipo y lesiones al personal. La central dejó escapar radionucleidos a la atmósfera, que se depositaron en la tierra y el océano. También hubo emisiones directas al mar.

Los habitantes de 20 km a la redonda y de otras zonas designadas fueron evacuados, y los que se encontraban en un radio de entre 20 y 30 km recibieron primero la instrucción de permanecer en espacios interiores, y más tarde el consejo de evacuar la zona voluntariamente. Se impusieron restricciones a la distribución y el consumo de alimentos y al consumo de agua potable. Cuando se elaboró el presente informe, muchas personas aún no habían regresado a las zonas de las que habían sido evacuadas.

Una vez estabilizadas las condiciones de los reactores de la central de Fukushima Daiichi²⁴, se iniciaron los trabajos para preparar su clausura. Los esfuerzos para la recuperación de las zonas afectadas por el accidente, incluida la restauración y revitalización de las comunidades y la infraestructura, comenzaron en 2011.

²¹ Marzo de 2015. En algunos casos se ha incluido la información disponible hasta junio de 2015, cuando ha sido posible.

²² De las seis unidades de la central nuclear de Fukushima Daiichi, la 1, la 2 y la 3 estaban funcionando en el momento del accidente; las Unidades 4, 5 y 6 estaban en una parada programada.

²³ Las centrales nucleares de Higashidori, Onagawa, Fukushima Daini y Tokai Daini.

²⁴ El 16 de diciembre de 2011, la Oficina de Respuesta Integrada Gobierno-TEPCO anunció que en las Unidades 1 a 3 se habían alcanzado las condiciones del 'estado de parada fría'. La expresión 'estado de parada fría' fue definida en ese momento por el Gobierno del Japón específicamente para la central nuclear de Fukushima Daiichi. Esa definición difiere de la terminología empleada por el OIEA y por otros.

1.1. EL INFORME SOBRE EL ACCIDENTE DE FUKUSHIMA DAIICHI

En la Conferencia General del OIEA celebrada en septiembre de 2012, el Director General anunció que el OIEA prepararía un informe sobre el accidente de Fukushima Daiichi. Más tarde afirmó que dicho informe sería “una evaluación autorizada, realista y equilibrada, que abordaría las causas y consecuencias del accidente, así como las enseñanzas extraídas” [2].

El informe sobre el accidente de Fukushima Daiichi es fruto de una extensa labor de colaboración internacional en que participaron cinco grupos de trabajo, integrados por unos 180 expertos procedentes de 42 Estados Miembros (con y sin programas de energía nucleoelectrica) y varios órganos internacionales. Esto permitió contar con un amplio abanico de experiencias y conocimientos. Un Grupo Técnico Asesor Internacional proporcionó asesoramiento sobre cuestiones técnicas y científicas. Se estableció un Grupo Central, integrado por altos funcionarios del OIEA, para que dirigiera los trabajos y facilitara la coordinación y el examen del informe. También se establecieron otros mecanismos de examen interno y externo, como se ilustra en la figura 1.1.

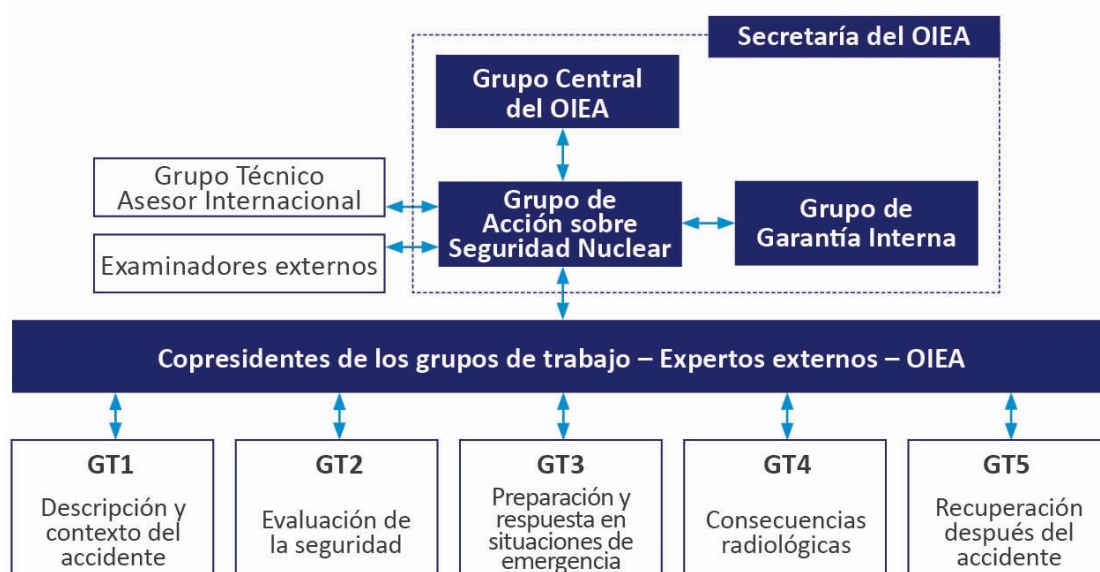


Fig. 1.1. Estructura orgánica para la preparación del informe del OIEA sobre el accidente de Fukushima Daiichi.

El presente Informe del Director General consiste en un Resumen ejecutivo y un Informe resumido. Se basa en cinco volúmenes técnicos detallados preparados por expertos internacionales y en las contribuciones de los numerosos expertos y órganos internacionales que participaron en su elaboración. El Informe proporciona una descripción del accidente y de sus causas, su evolución y sus consecuencias, sobre la base de la evaluación de los datos y la información obtenidos de un gran número de fuentes hasta marzo de 2015, incluidos los resultados del trabajo realizado para aplicar el Plan de Acción del OIEA sobre Seguridad Nuclear (el Plan de Acción)²⁵, y destaca las principales observaciones y lecciones aprendidas. El Gobierno del Japón y otras organizaciones del país proporcionaron grandes cantidades de datos.

²⁵ El Plan de Acción, aprobado por unanimidad en la quincuagésima quinta reunión de la Conferencia General del OIEA, en 2011, definió un programa de trabajo para reforzar el marco global de seguridad nuclear. El Plan de Acción consta de 12 medidas principales, que se relacionan con: las evaluaciones de la seguridad; los exámenes por homólogos del OIEA; la preparación y respuesta en situaciones de emergencia; los órganos reguladores nacionales; las entidades explotadoras; las normas de seguridad del OIEA; el marco jurídico internacional; los Estados Miembros que están planificando iniciar un programa nucleoelectrico; la creación de capacidad; la protección de las personas y el medio ambiente contra la radiación ionizante; la comunicación y la difusión de información; y la investigación y el desarrollo. En la sección 6.1 figura un examen detallado del Plan de Acción.

Los cinco volúmenes técnicos están destinados a un público técnico, como las autoridades competentes de los Estados Miembros del OIEA, las organizaciones internacionales, los órganos reguladores nucleares, las organizaciones explotadoras de centrales nucleares, los diseñadores de instalaciones nucleares y otros expertos en asuntos relacionados con la energía nucleoelectrónica.

El presente Informe del Director General comprende las seis secciones siguientes:

- Sección 1: Introducción.
- Sección 2: El accidente y sus causas, con una descripción de la secuencia de sucesos y una evaluación de la forma en que los fenómenos naturales extremos condujeron al accidente nuclear severo.
- Sección 3: La preparación y respuesta en situaciones de emergencia, incluidas las disposiciones adoptadas para la protección de los trabajadores de emergencias y de la población, y la aplicación de esas disposiciones durante el accidente e inmediatamente después.
- Sección 4: Las consecuencias radiológicas del accidente, incluida la exposición a la radiación experimentada por los trabajadores y la población, y los efectos en la salud y el medio ambiente.
- Sección 5: Las actividades de recuperación después del accidente, incluidas la clausura de la central, las estrategias de restauración de las zonas afectadas fuera del emplazamiento, la gestión de los desechos y las estrategias de revitalización.
- Sección 6: Un panorama general de las actividades realizadas por el OIEA y las Partes Contratantes en la Convención sobre Seguridad Nuclear en respuesta al accidente.

Las observaciones y lecciones fundamentales dimanantes de las características específicas del accidente se exponen en las secciones 2 a 5. La relación entre el contenido del Informe del Director General y el de los volúmenes técnicos se ilustra en la figura 1.2.

Sección 1: Introducción	Informe sobre el accidente de Fukushima Daiichi					
Sección 2: El accidente y su evaluación	Descripción del accidente	Consideraciones de seguridad nuclear	Volúmenes técnicos 1 y 2			
Sección 3: Preparación y respuesta en situaciones de emergencia	Respuesta inicial del Japón al accidente	Protección de los trabajadores de emergencias	Protección de la población	Transición de la fase de emergencia a la fase de recuperación y análisis de la respuesta	Respuesta dentro del marco internacional para la preparación y respuesta en situaciones de emergencia	Volumen técnico 3
Sección 4: Consecuencias radiológicas	Radiactividad en el medio ambiente	Protección de las personas contra la exposición a la radiación	Exposición a la radiación	Efectos en la salud	Consecuencias radiológicas para la biota no humana	Volumen técnico 4
Sección 5: Recuperación después del accidente	Restauración de las zonas afectadas por el accidente fuera del emplazamiento	Estabilización en el emplazamiento y preparativos para la clausura	Gestión de los materiales contaminados y de los desechos radiactivos	Revitalización de las comunidades y participación de los interesados		Volumen técnico 5
Sección 6: Respuesta del OIEA al accidente	Actividades del OIEA	Reuniones de las Partes Contratantes en la Convención sobre Seguridad Nuclear	Volúmenes técnicos 1 y 3			

Fig. 1.2. Estructura del Informe resumido y su relación con el contenido de los volúmenes técnicos.

2. EL ACCIDENTE Y SU EVALUACIÓN

En la presente sección figura una breve descripción del accidente ocurrido en la central nuclear de Fukushima Daiichi, seguida de una evaluación de los factores que se considera que contribuyeron a sus causas y consecuencias.

En la sección 2.1 se describen los principales sucesos en orden cronológico, incluidos los efectos del terremoto y el tsunami y los acontecimientos que siguieron.

En la sección 2.2 se analizan las causas del accidente. Comienza con una evaluación de la vulnerabilidad de la central nuclear de Fukushima Daiichi a los peligros externos y describe su diseño, la progresión del accidente, los esfuerzos de los operadores por mantener las funciones de seguridad fundamentales y las medidas que adoptaron. En esta sección se examinan también la eficacia del marco regulador del Japón y los efectos de las consideraciones humanas y organizativas en la seguridad nuclear.

2.1. DESCRIPCIÓN DEL ACCIDENTE

La descripción que sigue se basa principalmente en la información proporcionada al OIEA por el Gobierno del Japón [3, 4] y los informes de los comités de investigación establecidos por el Gobierno del Japón [5, 6], la Dieta Nacional del Japón [7] y la TEPCO [8], con inclusión de las actualizaciones y los suplementos de la TEPCO [9, 10], el órgano regulador [11] y las misiones del OIEA que se enumeran en la sección 6. Las otras fuentes de las que se tomó información se citan por separado.

Los sucesos se exponen en orden cronológico. Algunos de los acontecimientos principales ocurrieron en paralelo o repercutieron en las medidas adoptadas en otros lugares del emplazamiento.

2.1.1. Suceso iniciador y respuesta

El terremoto y la pérdida del suministro eléctrico exterior

El gran terremoto del Japón oriental del 11 de marzo de 2011 se produjo a las 14.46 horas, hora estándar del Japón, o las 5.46 horas UTC²⁶, frente a la costa oriental del Japón. Fue causado por una liberación súbita de energía en la superficie de contacto de la placa tectónica del Pacífico con la placa tectónica Norteamericana, bajo la cual se sumerge (figura 2.1). El sismo principal, de una magnitud de 9,0 [12], duró más de dos minutos, con varios pulsos y réplicas fuertes. Este suceso figura entre los terremotos más grandes registrados hasta la fecha, que en su mayoría se han producido a lo largo de la placa tectónica del Pacífico: los terremotos de 1960 y 2010 de Chile, de una magnitud de 9,5 y 8,8, respectivamente, y los de Alaska (1964) y Sumatra (2004), ambos de una magnitud de 9,2.

²⁶ Tiempo universal coordinado, nueve horas menos que la hora del Japón. A menos que se indique otra cosa, en este informe todos los tiempos se dan en la hora estándar del Japón.



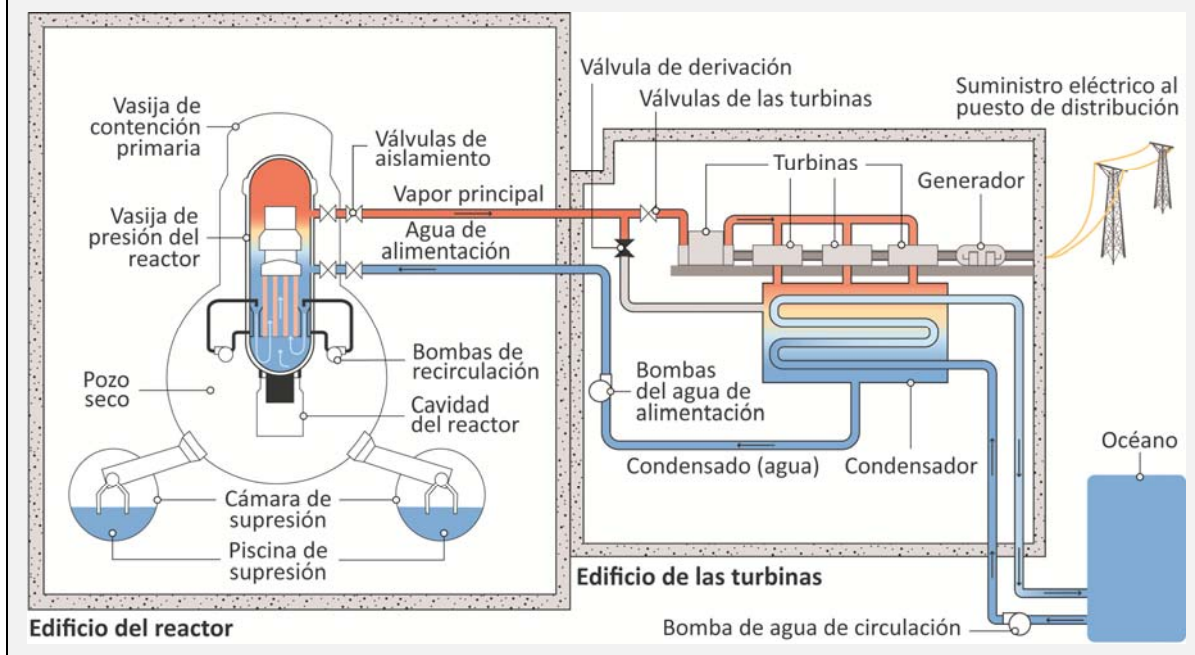
Fig. 2.1. Epicentro del gran terremoto del Japón oriental y centrales nucleares cercanas.

Cuando se produjo el terremoto, tres de los seis reactores de agua en ebullición (recuadro 2.1) de la central nuclear de Fukushima Daiichi [13] estaban funcionando a plena potencia y tres estaban parados para la recarga de combustible y el mantenimiento. Los reactores en funcionamiento de las Unidades 1 a 3 pararon automáticamente cuando los sensores de la central detectaron el movimiento de la tierra y activaron los sistemas de protección de los reactores de acuerdo con el diseño. Esta acción automática permitió controlar la reactividad.

Una vez parados, los núcleos de los reactores siguieron generando calor (denominado calor de decaimiento). Para evitar que el combustible nuclear se sobrecalentara, debía eliminarse ese calor mediante sistemas de refrigeración que funcionaban o se controlaban principalmente con energía eléctrica. El terremoto dañó el equipo del puesto de distribución de electricidad dentro del emplazamiento, el equipo de la subestación fuera del emplazamiento y el tendido eléctrico que suministraba corriente alterna a la central desde fuera, provocando la pérdida total del suministro eléctrico exterior. Los dispositivos de producción eléctrica de sustitución del emplazamiento —los generadores diésel de emergencia— diseñados para hacer frente a esas situaciones de interrupción del suministro eléctrico exterior se pusieron en marcha automáticamente para restablecer la corriente alterna en las seis unidades.

Recuadro 2.1. Reactores de agua en ebullición

Los reactores de agua en ebullición utilizan un ciclo de vapor directo de lazo cerrado, como se ilustra esquemáticamente a continuación. El fluido de trabajo es el agua, que actúa a la vez como refrigerante, para eliminar el calor, y como moderador, para controlar la reactividad. El agua refrigerante entra en ebullición dentro del núcleo del reactor a una presión de aproximadamente 7 MPa, y el vapor generado se utiliza para impulsar turbinas y producir electricidad. Tras su paso por las turbinas, el vapor se transforma nuevamente en agua al ser enfriado por los tubos del condensador, que están llenos de agua fría procedente de un sumidero de calor, por ejemplo el océano. El agua obtenida por condensación se reintroduce luego en el reactor, por bombeo, como agua de alimentación.



Las Unidades 1 a 3 quedaron automáticamente aisladas de sus sistemas de turbinas al producirse la interrupción del suministro eléctrico, lo que provocó aumentos de la temperatura y la presión en los reactores a causa del calor de decaimiento. La refrigeración de estos reactores después de que quedaron aislados se realizó mediante las siguientes disposiciones de diseño y operacionales (recuadro 2.2):

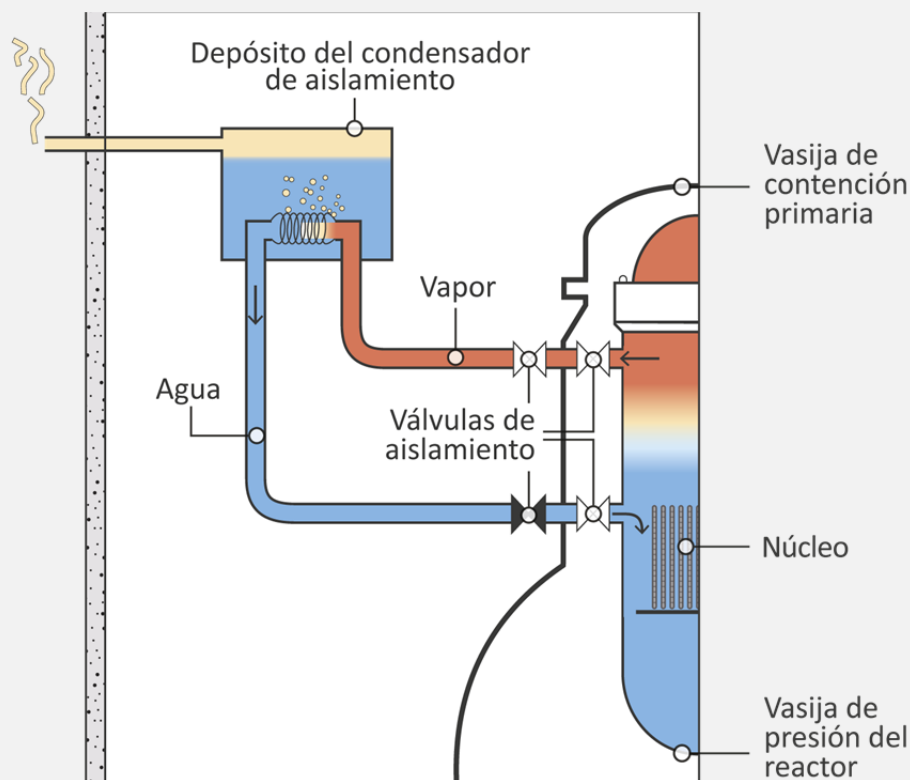
- En la Unidad 1, al aumentar la presión en el reactor, ambos lazos del sistema del condensador de aislamiento se pusieron en marcha automáticamente y siguieron enfriando el reactor. La activación de los dos lazos del condensador de aislamiento redujo la presión y la temperatura del reactor con tal rapidez, que los operadores, siguiendo los procedimientos establecidos, detuvieron su funcionamiento manualmente para evitar la tensión térmica en la vasija de presión del reactor. Posteriormente, los operadores utilizaron solo uno de los lazos para mantener la tasa de enfriamiento²⁷ dentro del rango prescrito por los procedimientos.
- En las Unidades 2 y 3, el aumento de la presión en el reactor activó automáticamente las válvulas de alivio y seguridad, diseñadas para proteger al reactor de una sobrepresurización dejando escapar el vapor de la vasija del reactor hacia la sección de la piscina de supresión de la vasija de contención primaria. Esto redujo los niveles de agua del reactor. Los operadores activaron manualmente el sistema de refrigeración del núcleo del reactor aislado, de conformidad con lo establecido en los procedimientos.

²⁷ En los reactores de agua en ebullición, la tasa de enfriamiento se vigila y se controla reduciendo la presión en el reactor, lo que a su vez corresponde a una disminución de la temperatura en el reactor.

Recuadro 2.2. Sistemas para enfriar el núcleo cuando el reactor está aislado de las turbinas

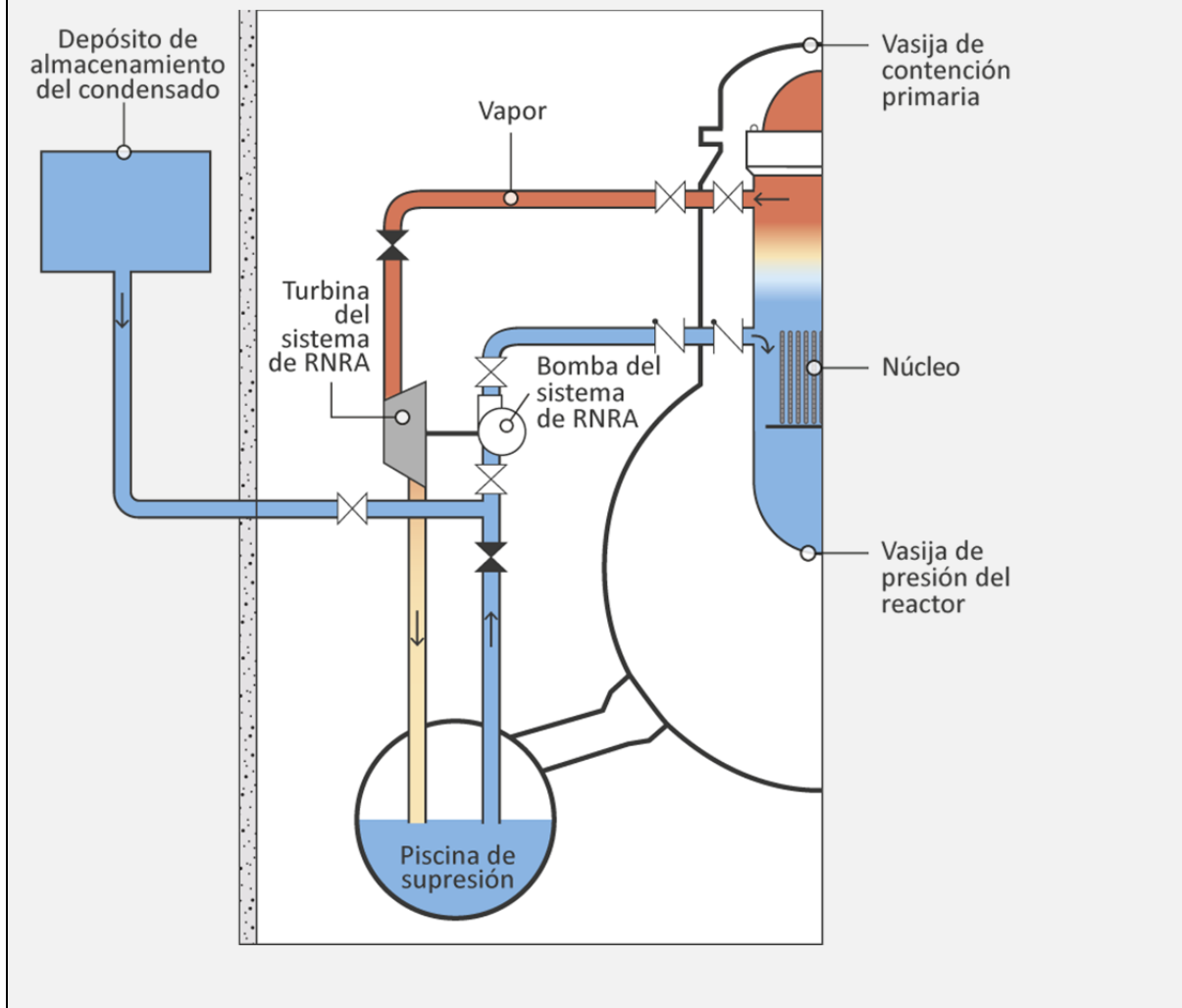
En condiciones normales, la refrigeración en parada de un reactor de agua en ebullición a alta presión se realiza derivando el vapor del reactor hacia el condensador principal, sin pasar por las turbinas (véase el recuadro 2.1). Sin embargo, cuando el reactor está aislado, esta vía no está disponible, y la refrigeración del núcleo corre a cargo de los sistemas diseñados para un reactor aislado en las condiciones de alta presión que existen después de la parada del reactor. En el diseño de la central nuclear de Fukushima Daiichi, estos eran: el sistema del condensador de aislamiento, para la Unidad 1 (el diseño más antiguo), y el sistema de refrigeración del núcleo del reactor aislado (RNRA), para las Unidades 2 a 6.

Condensador de aislamiento. En el diseño de la Unidad 1, había dos lazos separados y redundantes en el condensador de aislamiento. En estos lazos cerrados, la parte primaria del condensador de aislamiento recibía el vapor generado en el reactor y lo condensaba enfriándolo dentro de los tubos intercambiadores de calor que estaban sumergidos en depósitos de agua más fría (las piscinas del condensador de aislamiento), situados fuera de la vasija de contención primaria. El vapor condensado volvía al reactor por gravedad, en forma de agua fría (véase el diagrama a continuación). Sin mezclarse con el agua radiactiva de la parte primaria, el agua de la parte secundaria de las piscinas del condensador de aislamiento entraba en ebullición, y el vapor generado se ventaba a la atmósfera, que actuaba como sumidero de calor. El volumen de agua de la parte secundaria del condensador de aislamiento (ambos tramos juntos) era suficiente para la refrigeración durante ocho horas, después de lo cual había que reponer el agua a partir de una fuente establecida con ese fin.



Refrigeración del núcleo del reactor aislado (RNRA). En el diseño de las Unidades 2 a 6, había sistemas de refrigeración de ciclo abierto, que requerían una fuente que añadiera agua al sistema del reactor. En los sistemas de refrigeración del núcleo del reactor aislado, el vapor del reactor impulsaba una pequeña turbina que, a su vez, hacía funcionar una bomba que inyectaba agua en el reactor a alta presión. El vapor que impulsaba la turbina se descargaba y acumulaba en la sección de la piscina de supresión de la vasija de contención primaria, que actuaba como sumidero de calor y absorbía el calor de desecho. El agua perdida por el reactor se reponía con agua dulce procedente del depósito de almacenamiento del condensado (véase el diagrama a continuación). Cuando el depósito se vaciaba o la piscina de supresión se llenaba, se podía utilizar el agua acumulada en esta piscina, con lo cual el sistema pasaba a ser básicamente un ciclo de lazo cerrado. La refrigeración del núcleo del reactor aislado estaba diseñada para funcionar por lo menos durante cuatro horas.

Recuadro 2.2. Sistemas para enfriar el núcleo cuando el reactor está aislado de las turbinas (cont.)



El calor de decaimiento del combustible nuclear de las Unidades 4 a 6 también debía evacuarse:

- En la Unidad 4, el equipo de refrigeración y reposición del agua de la piscina de combustible gastado²⁸ dejó de funcionar a causa de la pérdida del suministro eléctrico exterior. La piscina de combustible gastado de esa unidad, que contenía más de 1300 conjuntos combustibles gastados, era, de todas las de la central, la que más calor de decaimiento tenía que eliminar.
- En la Unidad 5, la presión del reactor, que en el momento del terremoto se estaba manteniendo alta mediante el uso de una bomba para efectuar ensayos de presión, bajó inicialmente al detenerse la bomba a causa de la pérdida del suministro eléctrico exterior. La presión comenzó a subir debido al calor de decaimiento, pero, a diferencia de lo ocurrido en las Unidades 2 y 3, se mantuvo muy por debajo de los niveles necesarios para la activación de las válvulas de alivio y seguridad.
- En la Unidad 6, el reactor estaba casi a presión atmosférica y temperatura ambiente, con combustible en el núcleo, y el calor de decaimiento era bajo.

²⁸ Las piscinas de combustible gastado, en que se almacenan los conjuntos combustibles usados y nuevos, están llenas de agua, que ofrece blindaje contra la radiación y elimina el calor generado por el combustible nuclear que en ellas se encuentra. No obstante, sin refrigeración, el agua de la piscina se calentaría y, llegado un cierto punto, empezaría a evaporarse. Si esta situación continúa sin que se reponga el agua, el enfriamiento del combustible se acaba cuando el nivel del agua baja lo suficiente como para que el combustible quede expuesto al aire. El sobrecalentamiento y la exposición dañan el combustible y provocan la emisión de radionucleidos.

En las piscinas de combustible gastado de todas las unidades y en la piscina de combustible gastado común²⁹, que perdieron la capacidad de refrigeración y rellenado al cortarse el suministro eléctrico exterior, las temperaturas del agua comenzaron a subir debido al calor de decaimiento.

Ante el terremoto y la pérdida del suministro eléctrico exterior, los operadores activaron los procedimientos de operación anormal ‘basados en sucesos’ en las tres salas de control principales de las seis unidades.³⁰ En el centro de respuesta a la emergencia del emplazamiento, situado dentro del edificio ‘sísmicamente aislado’³¹, se activó un grupo de respuesta a la emergencia causada por el terremoto. El Superintendente del emplazamiento, en calidad de jefe del centro de respuesta a la emergencia del emplazamiento de la TEPCO, quedó encargado de dirigir la respuesta en el emplazamiento y de coordinarse con las organizaciones internas y externas. Tres superintendentes de turno en cada una de las salas de control principales asumieron la responsabilidad de dirigir la actuación en sus unidades, bajo el mando del Superintendente del emplazamiento.

Las unidades de la central nuclear de Fukushima Daiichi respondieron al suceso iniciador —el terremoto y la pérdida concomitante del suministro eléctrico exterior— tal como habían previsto los diseñadores y estaba estipulado en los procedimientos de operación (con excepción de algunas acciones de los operadores que se vieron restringidas o retrasadas por las réplicas) (figura 2.2).

²⁹ Como instalación auxiliar compartida por todas las unidades, la piscina de combustible gastado común, situada en un edificio aparte cerca de la Unidad 4, contenía más de 6000 conjuntos combustibles gastados, todos los cuales requerían la evacuación de su calor de decaimiento.

³⁰ Cada par de unidades (es decir, las Unidades 1 y 2, las Unidades 3 y 4 y las Unidades 5 y 6) tenía una sala de control principal común.

³¹ El edificio sísmicamente aislado había sido construido tras la experiencia adquirida con los efectos del terremoto de Niigata-Chuetsu-Oki en la central nuclear de Kashiwazaki-Kariwa, en 2007, y había entrado en funcionamiento en julio de 2010. Estaba diseñado para resistir a los terremotos y equipado con un suministro eléctrico de reserva. Tenía ventilación filtrada y blindaje para proteger contra la radiactividad.

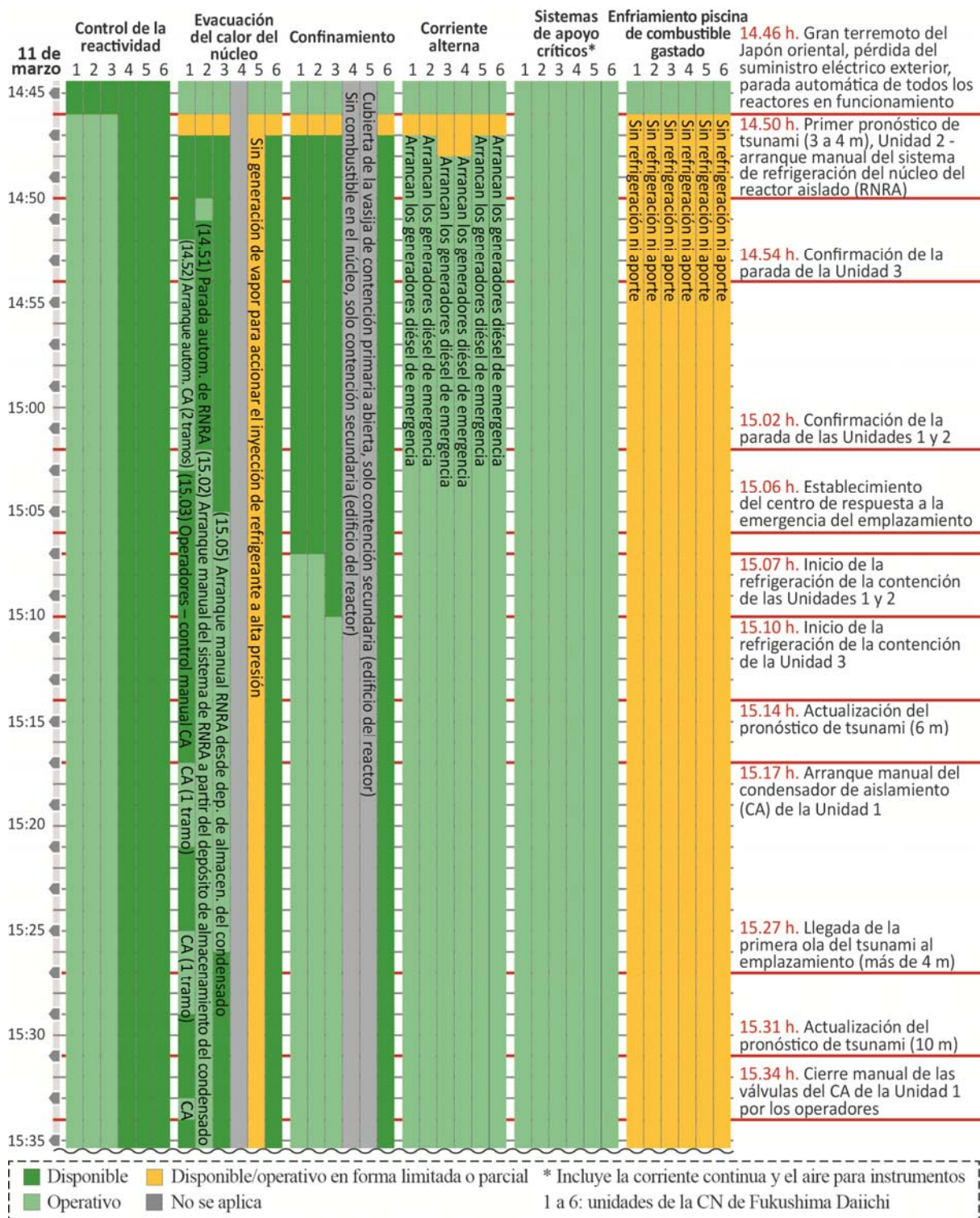


Fig. 2.2. Respuesta de la central nuclear de Fukushima Daiichi al terremoto y a la pérdida del suministro eléctrico exterior.

El tsunami y el apagón de la central

Además de provocar un intenso movimiento de la tierra, el terremoto desplazó una ingente cantidad de agua, que generó una serie de grandes olas de tsunami [14]. Cuando esas olas del tsunami llegaron a la costa, produjeron un efecto devastador en una extensa zona (figura 2.3).

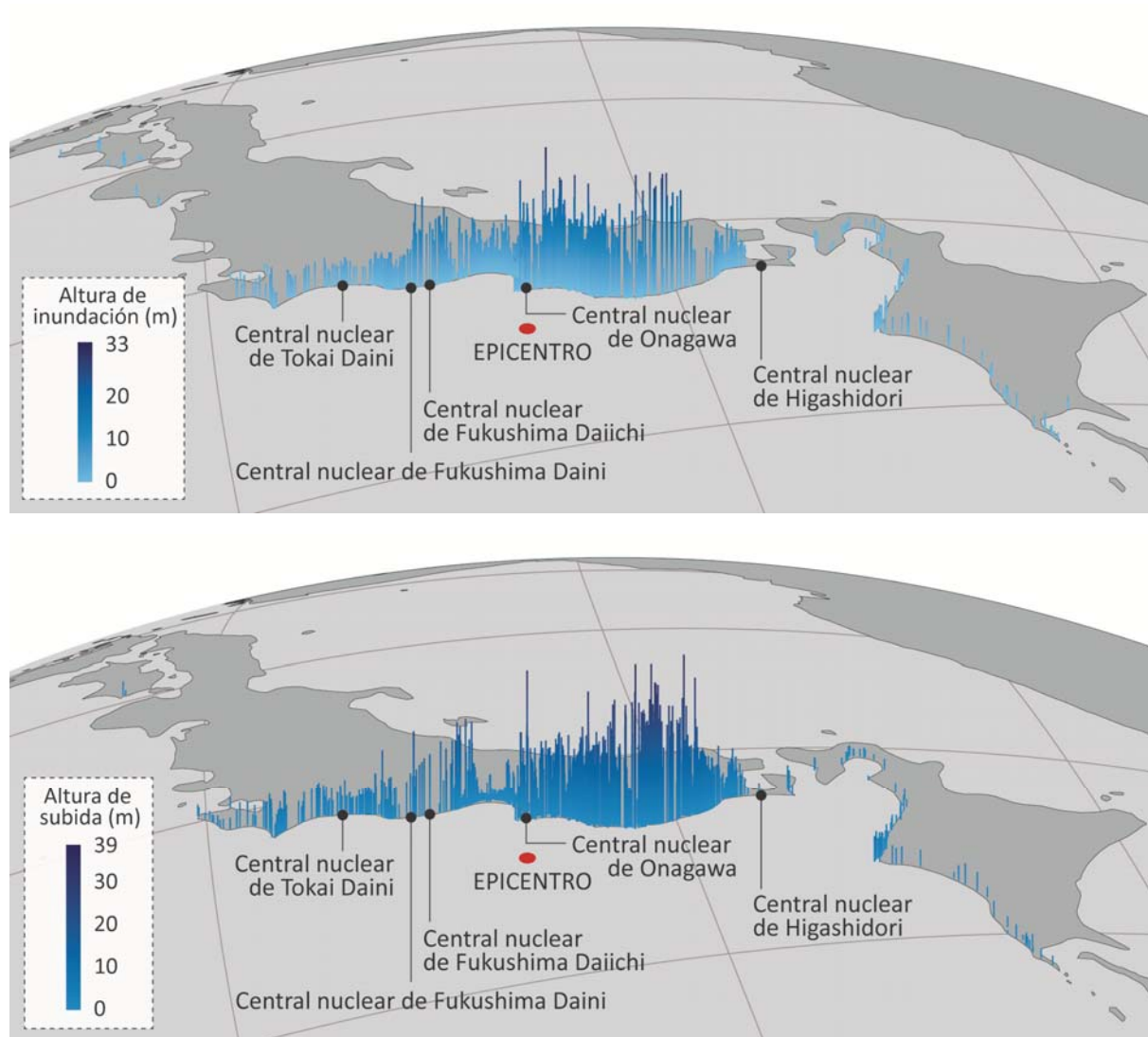


Fig. 2.3. Variación del impacto de las olas del tsunami, línea de inundación (arriba) y subida de las olas (abajo)³², según la geografía y la topografía costeras [15].

Las olas del tsunami comenzaron a llegar a la central nuclear de Fukushima Daiichi alrededor de 40 minutos después del terremoto. El emplazamiento quedó protegido de la primera ola, de una altura de subida de entre 4 y 5 metros, por la barrera de diques marítimos diseñados para proteger la costa contra un tsunami de una altura máxima de 5,5 metros [16]. Sin embargo, unos 10 minutos después, una segunda ola, la más grande de todas, de una subida de entre 14 y 15 metros, superó los diques e

³² La altura de subida es la altura de la ola en el punto de máxima penetración tierra adentro, y la altura de inundación es la altura de la cresta de la ola en comparación con el nivel del mar.

inundó el emplazamiento. Sumergió todas las estructuras y el equipo situados a nivel del mar, así como los edificios principales (incluidos los de los reactores, las turbinas y los servicios) construidos en terrenos más elevados³³ (figura 2.4), causando la siguiente secuencia de sucesos:

- La ola inundó y dañó las bombas de agua de mar y los motores no protegidos de los sitios de toma de agua de mar en la costa. Esto eliminó la posibilidad de enfriar los sistemas y componentes esenciales de la central, incluidos los generadores diésel de emergencia refrigerados por agua³⁴, para que pudieran seguir funcionando.
- La ola inundó y dañó el edificio de almacenamiento en seco en cofres situado cerca de la costa, entre las Unidades 1 a 4 y las Unidades 5 y 6. Los propios cofres y el combustible almacenado en ellos no sufrieron efectos importantes, como se pudo comprobar posteriormente [17].
- El agua inundó los edificios, incluidos los de todos los reactores y las turbinas, el de almacenamiento común de combustible gastado y el de los generadores diésel, dañando la estructura y el equipo eléctrico y mecánico que se encontraba en las plantas bajas y en los primeros pisos de esos edificios. Entre el equipo que sufrió daños figuraban los generadores diésel de emergencia o sus conexiones eléctricas, lo que se tradujo en la pérdida de la alimentación de corriente alterna de emergencia. Solo uno de los generadores diésel de emergencia refrigerados por aire —el de la Unidad 6— no se vio afectado por la inundación³⁵. Siguió en funcionamiento, suministrando corriente alterna de emergencia a los sistemas de seguridad de la Unidad 6 y permitiendo la refrigeración de ese reactor.

Como consecuencia de estos sucesos, las Unidades 1 a 5 perdieron la alimentación de corriente alterna, situación conocida como un apagón de la central.

Debido al apagón en las Unidades 1 a 5, se activaron los procedimientos de operación de emergencia para casos de ‘pérdida de toda la alimentación de corriente alterna’ [18]. El Superintendente del emplazamiento, que era el jefe del centro de respuesta a la emergencia interno de la organización explotadora, la TEPCO, declaró la existencia de un ‘suceso específico’, según la definición del reglamento relacionado con la Ley de Medidas Especiales relativas a la Preparación para Emergencias Nucleares [19], en adelante denominada Ley de Emergencias Nucleares, basándose en la condición de que ‘algunos sistemas de seguridad no estaban disponibles’. En consecuencia, se dio aviso de ello a los organismos externos pertinentes, de conformidad con lo exigido por la Ley de Emergencias Nucleares.

Las unidades de la central nuclear de Fukushima Daiichi, como las de otras centrales de la misma antigüedad, estaban diseñadas para resistir a un apagón de ocho horas, sobre la base de la capacidad de las baterías de corriente continua de las unidades³⁶.

³³ Los edificios de la administración y el edificio sísmicamente aislado en que se estableció el centro de respuesta a la emergencia del emplazamiento se encontraban en un terreno elevado, de una altura aproximada de 35 m (la elevación topográfica inicial del emplazamiento, antes de que el área se excavara para colocar las unidades durante la construcción).

³⁴ Cada unidad tenía un par de generadores diésel de emergencia, y la Unidad 6 tenía uno adicional. De esos 13 generadores diésel de emergencia, tres, uno de cada una de las Unidades 2, 4 y 6, eran generadores refrigerados por aire. Al ser refrigerados por aire, su operabilidad no se vio directamente afectada por la pérdida de agua de refrigeración causada por el daño a las bombas de agua de mar.

³⁵ Los generadores diésel de emergencia refrigerados por aire de las Unidades 2, 4 (en la planta baja del edificio del combustible gastado común) y 6 (en el primer piso de un edificio aparte para los generadores diésel, situado a más altura) no resultaron afectados por la inundación. Sin embargo, los componentes (es decir, el aparellaje eléctrico, los centros y paneles de alimentación, etc.) de los generadores diésel de emergencia refrigerados por aire de las Unidades 2 y 4, que se encontraban en el sótano del edificio del combustible gastado común, fueron dañados por el agua.

³⁶ Las centrales nucleares suelen estar equipadas con fuentes internas de corriente continua y fuentes adicionales de reserva de corriente alterna (es decir, generadores de turbina de gas o motores diésel) para resistir a un apagón por un período limitado de tiempo que varía entre 4 y 72 horas. La determinación del período de respuesta se basa principalmente en el tiempo necesario para restablecer las fuentes de corriente alterna de la central nuclear y en la capacidad de las medidas disponibles. Durante ese período se utiliza equipo como las baterías de corriente continua, los convertidores de corriente continua en alterna y otras fuentes secundarias de reserva de corriente alterna (por ejemplo, las turbinas de gas o los generadores diésel).

Debido a la pérdida de toda la alimentación eléctrica de corriente alterna y continua, los operadores de las Unidades 1 y 2 no pudieron seguir monitorizando los parámetros esenciales de la central, como la presión de los reactores y sus niveles de agua, o el estado de los sistemas y componentes fundamentales para la refrigeración del núcleo. Como se mencionó anteriormente, la capacidad de evacuación del calor de las piscinas de combustible gastado de todas las unidades ya se había perdido con el corte del suministro eléctrico exterior. La pérdida adicional de la corriente continua en las Unidades 1, 2 y 4 impidió a los operadores seguir monitorizando la temperatura y los niveles del agua en las piscinas de combustible gastado de esas unidades.

Al no existir procedimientos para la pérdida de toda la alimentación eléctrica de corriente alterna y continua, los operadores de las Unidades 1, 2 y 4 no tenían instrucciones específicas para hacer frente a un apagón de la central en esas condiciones. Los operadores y el personal del centro de respuesta a la emergencia comenzaron a analizar las opciones disponibles y a determinar las posibles formas de restablecer el suministro eléctrico y, de ese modo, la capacidad de monitorizar y controlar la central.

Respuesta en las Unidades 3, 5 y 6

Las Unidades 3, 5 y 6 conservaron el suministro eléctrico, permitiendo así que los operadores observaran el estado de las instalaciones, ya que los principales controles e indicaciones de las salas de control estaban funcionando. Ello permitió a los operadores continuar con sus procedimientos de operación de emergencia ‘basados en los síntomas’ en respuesta a los sucesos:

- En la Unidad 3, las válvulas de alivio y seguridad se abrieron automáticamente para proteger la vasija del reactor contra una sobrepresurización, y los operadores hicieron un rearranque manual del sistema de refrigeración del núcleo del reactor aislado, controlando y monitorizando la inyección de agua en el reactor con la corriente continua disponible. También cerraron todo el equipo no indispensable, para elevar al máximo la disponibilidad de las baterías de corriente continua a fin de prolongar el período de tiempo disponible para hacer frente al apagón de la central.
- La Unidad 5 tampoco había perdido la corriente continua. El reactor no estaba generando vapor, de modo que no era posible eliminar el calor residual mediante el sistema de refrigeración de alta presión. Por consiguiente, se intentaron otras opciones para despresurizar la vasija del reactor y poder inyectar refrigerante mediante sistemas de baja presión, pero estos esfuerzos fueron infructuosos y la temperatura y la presión de la vasija del reactor, que estaba presurizada y llena de agua, siguieron aumentando.
- La Unidad 6 no experimentó el apagón, ya que uno de los generadores diésel de emergencia siguió funcionando y suministrando corriente alterna. En esta unidad, los esfuerzos se centraron en mantener las funciones de seguridad fundamentales en respuesta a la pérdida del suministro eléctrico exterior. El reactor estaba a presión atmosférica, por lo que se pudieron utilizar los sistemas de baja presión para inyectar agua de refrigeración; sin embargo, algunos de los componentes necesarios de esos sistemas habían sufrido daños con la inundación y tuvieron que ser reparados.

2.1.2. Progresión del accidente

La emergencia nuclear en las Unidades 1 y 2

Al haberse perdido todo el suministro eléctrico en las Unidades 1 y 2, los operadores no disponían de ninguna indicación que les permitiera determinar si los sistemas de seguridad estaban funcionando correctamente, o incluso si estaban funcionando o no, para mantener las funciones de seguridad fundamentales³⁷. No pudiendo determinar el nivel de agua en el reactor ni el estado operacional de los

³⁷ La función de seguridad fundamental del control de la reactividad se había confirmado antes del apagón de la central mediante indicaciones que habían demostrado que las barras de control estaban insertadas y las reacciones de fisión habían cesado.

sistemas de refrigeración, los operadores de la planta declararon que se había perdido la función de seguridad fundamental de la refrigeración del núcleo. Por consiguiente, el centro de respuesta a la emergencia del emplazamiento comunicó a las organizaciones exteriores, la sede de la TEPCO y las autoridades gubernamentales competentes que en las Unidades 1 y 2 existían las condiciones de una emergencia nuclear por “la incapacidad de inyectar agua del sistema de refrigeración de emergencia del núcleo”, según la definición del reglamento [21].

Establecimiento de la estrategia de gestión de un accidente severo

El personal del centro de respuesta a la emergencia del emplazamiento comenzó a aplicar las directrices establecidas para la gestión de accidentes severos, y los operadores de la sala de control principal común de las Unidades 1 y 2 activaron el procedimiento de operación en caso de accidente severo. Puesto que la refrigeración de los núcleos parecía estar comprometida, la estrategia de gestión del accidente se centró en inyectar agua en los reactores para prevenir o mitigar los posibles daños al combustible nuclear. Se identificaron dos opciones para inyectar agua en los reactores:

- El uso de los sistemas capaces de inyectar agua directamente en los reactores, incluso a altas presiones, lo que requería el restablecimiento de la alimentación de corriente alterna.
- El uso de equipo alternativo, como los vehículos antiincendios y las bombas de incendios fijas accionadas por un motor diésel que podían inyectar agua a presiones bajas, lo que requería la despresurización de los reactores y la alineación de las tuberías de protección contra incendios para inyectar agua en el núcleo.³⁸

El centro de respuesta a la emergencia del emplazamiento adoptó una estrategia para refrigerar el núcleo consistente en utilizar las bombas de incendios fijas accionadas por un motor diésel y vehículos antiincendios para inyectar agua en los reactores a través del sistema de protección contra incendios, además de conectar fuentes de energía eléctrica temporales.

Esta estrategia para hacer frente al accidente, a la que se dio la máxima prioridad para las Unidades 1 y 2, era aplicable también a las demás unidades con algunas variaciones. Por ejemplo, en la Unidad 5 la medida de gestión del accidente consistió en restablecer la alimentación de corriente alterna utilizando la línea disponible de interconexión³⁹ con el generador diésel de emergencia que estaba funcionando en la Unidad 6.

Situación de la refrigeración del núcleo en las Unidades 1 y 2

Justo antes de la llegada del tsunami, los operadores habían parado el condensador de aislamiento de la Unidad 1, siguiendo los procedimientos de operación establecidos para controlar la tasa de enfriamiento del reactor. Para ello se habían cerrado las válvulas (situadas fuera de la vasija de contención primaria y accionadas por corriente continua, como se muestra en el recuadro 2.2). Aproximadamente 2,5 horas después de la pérdida de las indicaciones, a las 18.18 horas del 11 de marzo, se observó que algunas de las luces de estado de esas válvulas estaban funcionando y se pudo confirmar que las válvulas estaban cerradas. Los operadores intentaron poner en marcha el condensador de aislamiento abriendo esas válvulas. Sin embargo, el condensador no se puso en marcha, lo que indicaba que las válvulas de aislamiento accionadas por corriente alterna de la vasija

³⁸ El sistema de protección contra incendios estaba diseñado principalmente para extinguir incendios e inundar la vasija de contención, no para inyectar agua en el reactor.

³⁹ Cerca de un decenio antes se habían instalado líneas eléctricas de conexión cruzada en la central nuclear de Fukushima Daiichi como una mejora de diseño para la gestión de accidentes. La única unidad que pudo compartir la fuente de electricidad de emergencia que estaba funcionando en la Unidad 6 fue la Unidad 5, porque esas interconexiones solo se habían instalado entre pares de unidades, es decir, entre las Unidades 1 y 2, las Unidades 3 y 4 y las Unidades 5 y 6.

de contención primaria estaban cerradas.⁴⁰ Así pues, la función de seguridad fundamental de la refrigeración del núcleo en la Unidad 1 se había perdido cuando los operadores habían detenido el condensador de aislamiento, justo antes de la llegada del tsunami, y el núcleo de esa unidad se había estado calentando desde ese momento.

Además, las mediciones locales (en el edificio del reactor) a las 20.07 horas indicaron que el reactor aún estaba a una presión cercana a la de funcionamiento, de 70 bar (7 MPa), lo que impedía inyectar agua por métodos alternativos, que solo serían posibles a presiones inferiores a 8 bar (0,8 MPa).

A las 19.03 horas del 11 de marzo, después de recibir varios informes del centro de respuesta a la emergencia del emplazamiento sobre el estado de la Unidad 1 y de las otras unidades, y tras haber obtenido la aprobación del Primer Ministro, el Gobierno del Japón declaró una emergencia nuclear.⁴¹

En la Unidad 2, que también estaba sin indicaciones del funcionamiento del sistema de refrigeración del núcleo y de la presión y la temperatura del núcleo, los operadores presupusieron el peor de los escenarios, es decir, que el sistema de refrigeración del núcleo del reactor aislado no estaba funcionando y que el núcleo de la Unidad 2 se estaba calentando. A las 21.01 horas, el centro de respuesta a la emergencia del emplazamiento comunicó a las autoridades gubernamentales que se preveía que el núcleo de la Unidad 2, privado de toda refrigeración, quedaría descubierto en torno a las 21.40 horas. Tras esta predicción, el Primer Ministro, en su calidad de Director General del Cuartel General de Respuesta a la Emergencia Nuclear, emitió, a las 21.23 horas del 11 de marzo, una orden de evacuación para la población que se encontraba a 3 km a la redonda, y de permanecer en espacios interiores para la población situada en un radio de 3 a 10 km del emplazamiento⁴².

La indicación del descubrimiento del núcleo de la Unidad 1 se obtuvo cuando un grupo enviado a las 21.51 horas para confirmar el estado de funcionamiento del condensador de aislamiento encontró altos niveles de radiación en el edificio del reactor de esa unidad.⁴³ Esto indicó la gravedad de las condiciones en el reactor de la Unidad 1 y el posible daño del núcleo.

Deterioro de las condiciones de confinamiento en la Unidad 1

Tras la confirmación de la pérdida de la refrigeración del núcleo en la Unidad 1, cuando se pudo efectuar la primera lectura de la presión de la vasija de contención, a las 23.50 horas del 11 de marzo, quedaron de manifiesto también los problemas con la otra función de seguridad fundamental, el confinamiento. La presión de la vasija de contención había superado la presión máxima considerada en su diseño, y esta información indujo al Superintendente del emplazamiento a ordenar que se iniciaran los preparativos para ventear las vasijas de contención de la Unidad 1. Esta situación también justificaba una notificación de emergencia, en razón de una ‘subida anormal de la presión en la vasija de contención primaria’, según la definición contenida en el reglamento relacionado con la Ley de Emergencias Nucleares [19].

⁴⁰ Los operadores no tenían claro cuál era la posición de las válvulas, debido a la incertidumbre respecto de los momentos y la secuencia en que se habían producido los distintos tipos de pérdida de electricidad que debían determinar el estado de las válvulas de aislamiento. Sin embargo, aunque todas las válvulas del condensador de aislamiento debían mantener su posición si se cortaba el suministro eléctrico, el diseño preveía que las válvulas de aislamiento accionadas por corriente alterna se cerraran si se perdía la energía eléctrica de control (es decir, la corriente continua).

⁴¹ Al mismo tiempo se estableció el Cuartel General de Respuesta a la Emergencia Nuclear en la Oficina del Primer Ministro, y este asumió las funciones de Director General de la respuesta nacional a la emergencia nuclear.

⁴² Más temprano, a las 20.50 horas, la administración local de la prefectura de Fukushima había emitido una orden de evacuación de los residentes en un radio de 2 km en torno a la central, después de haber evaluado la declaración nacional de emergencia nuclear y de haber examinado junto con funcionarios de la TEPCO la incertidumbre con respecto al estado de las centrales nucleares.

⁴³ Sus dosímetros personales registraron niveles de hasta 0,8 mSv en los diez segundos, aproximadamente, que permanecieron en el edificio.

Las mediciones de la presión en la contención de la Unidad 1 alcanzaron sus valores máximos a las 2.30 y las 2.45 horas del 12 de marzo.

Confirmación del estado de la Unidad 2 y concentración en la recuperación de la función de seguridad de la Unidad 1

A las 2.10 horas del 12 de marzo, un grupo pudo entrar en la sala en que se encontraba el equipo del sistema de refrigeración del núcleo del reactor aislado de la Unidad 2 y leer los parámetros para determinar el estado del sistema. El estado operacional fue comunicado al centro de respuesta a la emergencia del emplazamiento a las 2.55 horas del 12 de marzo y permitió aclarar la situación, hasta ese momento desconocida, de la refrigeración del núcleo de la Unidad 2, alrededor de 11 horas después de la pérdida de la monitorización en la sala de control principal. Al recibir la confirmación de la refrigeración del núcleo de la Unidad 2, y en vista del problema agudo con la función de confinamiento en la Unidad 1, el Superintendente del emplazamiento decidió concentrar la gestión del accidente en la tarea de ventear la Unidad 1.

Mientras se elaboraban los planes para el venteo, el descubrimiento, a las 1.48 horas del 12 de marzo, de que la bomba de incendios no estaba en condiciones de funcionar dejó en claro que la estrategia de gestión del accidente consistente en restablecer la refrigeración del núcleo de la Unidad 1 mediante la inyección de agua con esa bomba no era viable. Por lo tanto, se procedió a ejecutar la opción alternativa, que era la de utilizar camiones de bomberos conectados al orificio de inyección del edificio de las turbinas, instalado el año anterior como medida de protección contra incendios tras la experiencia del terremoto de Niigata-Chuetsu-Oki.

Calentamiento de la Unidad 5 y restablecimiento de la alimentación de corriente alterna

Más o menos al mismo tiempo, a las 1.40 horas del 12 de marzo, una válvula de alivio y seguridad de la Unidad 5 se abrió automáticamente por primera vez, alrededor de 10 horas después del apagón de la central, porque la presión del reactor había alcanzado el valor fijado para la apertura. La válvula se abrió y cerró automáticamente varias veces para mantener la presión en el rango determinado en el diseño porque el reactor de la Unidad 5 se había seguido calentando al no poder hacerse nada para evacuar el calor.

Las válvulas de alivio y seguridad estaban funcionando automáticamente para limitar la presión, pero no podían utilizarse para reducirla porque en la mayoría de ellas la función de despresurización había sido desactivada para el ensayo que estaba en curso antes del accidente. Se consideró la opción alternativa de reducir la presión abriendo una válvula pequeña (la tobera de venteo de la cabeza) de la vasija del reactor, ya que había corriente continua disponible para esta operación. Más tarde, a las 6.06 horas del 12 de marzo, unas 14,5 horas después del apagón de la central, se abrió por telecontrol la tobera de venteo de la cabeza, que se dejó abierta para reducir la presión de la vasija del reactor llena de agua. Además, la conexión eléctrica entre la Unidad 5 y el generador diésel de emergencia que estaba funcionando en la Unidad 6 quedó terminada cerca de 16,5 horas después del apagón de la central, lo que permitió hacer llegar algo de corriente alterna al equipo de la Unidad 5, por ejemplo a las bombas y las válvulas necesarias para evacuar el calor del reactor.

Refrigeración alternativa del núcleo de la Unidad 1

Entretanto, la presión del reactor de la Unidad 1 había bajado lo suficiente⁴⁴ para poder utilizar un método alternativo de inyección de agua. La aplicación de un método de refrigeración alternativo, a saber, la inyección de agua dulce en el reactor de la Unidad 1 mediante vehículos antiincendios para restablecer la

⁴⁴ La despresurización del reactor se había producido sin ninguna acción por parte de los operadores o de los sistemas de la planta, lo que indicaba que por alguna vía desconocida se estaba aliviando la presión.

refrigeración del núcleo, comenzó a las 4.00 horas del 12 de marzo, aproximadamente 12,5 horas después del apagón de la central. La operación continuó en forma intermitente durante unas 5,5 horas, inyectando el agua de un único camión de bomberos de una tonelada de capacidad, que tenía que volver cada vez al depósito de agua dulce para recargar su tanque. Al mismo tiempo, se seguía trabajando en la construcción de una tubería directa desde el depósito de agua dulce, y poco más de 17,5 horas después del apagón de la central comenzó la inyección continua de agua dulce en la Unidad 1 directamente desde ese depósito.

Venteo de la contención de la Unidad 1

La medición de la presión en la contención de la Unidad 1 a las 4.19 horas del 12 de marzo mostró que la presión había disminuido desde la última medición (a las 2.45 horas), sin ninguna intervención de un operador y sin que se hubiera establecido una ruta de venteo, lo que indicaba que por alguna vía desconocida se estaba produciendo un alivio no deliberado de la presión de la contención. Además, los niveles de radiación medidos poco después en la entrada principal revelaron un aumento⁴⁵. Esta también era una indicación de alguna emisión radiactiva no controlada desde la contención primaria, es decir, de la degradación del confinamiento. Ante el deterioro de las condiciones radiológicas en el emplazamiento y el aumento de la presión en la contención de la Unidad 1, a las 5.44 horas del 12 de marzo el Gobierno amplió la zona de evacuación a 10 km a la redonda.

El inicio de las actividades destinadas a configurar el venteo de la contención de la Unidad 1 se había fijado para las 9.00 horas del 12 de marzo. En cuanto se hubo recibido la confirmación de las autoridades de la prefectura de Fukushima, a las 9.02 horas, de que la evacuación del pueblo de Okuma⁴⁶ había concluido, se activaron los grupos y se inició la manipulación de las válvulas a fin de establecer la ruta para el venteo de la contención de la Unidad 1. Tras 5,5 horas de esfuerzos, la ruta de venteo (recuadro 2.3) quedó establecida cuando se abrió la última válvula, en torno a las 14.00 horas del 12 de marzo. El éxito de la operación de venteo fue confirmado por una disminución de la presión de la contención, medida a las 14.30 horas⁴⁷, y se comunicó a las autoridades gubernamentales pertinentes. Aunque no hubo ningún cambio inmediato significativo en las mediciones de la radiación dentro de los límites del emplazamiento, alrededor de una hora después, a las 15.29 horas⁴⁸, se registró una lectura de la tasa de dosis de radiación de aproximadamente 1 mSv/h en uno de los monitores del emplazamiento situado cerca del límite de este, al noroeste de la Unidad 1.

Pérdida de la refrigeración normal del núcleo y comienzo de la refrigeración de emergencia del núcleo en la Unidad 3

Mientras se establecía el venteo de la contención de la Unidad 1, la respuesta al apagón de la central en la Unidad 3 tuvo que modificarse cuando el sistema de refrigeración del núcleo del reactor aislado dejó de funcionar, a las 11.36 horas del 12 de marzo, después de casi 20,5 horas de funcionamiento ininterrumpido. Los operadores intentaron una y otra vez poner en marcha el sistema, pero no lo consiguieron; el agua del reactor siguió hirviendo y evaporándose y su nivel fue bajando.

⁴⁵ En alrededor de 10 veces (0,000 069 mSv/h medidos a las 4.00 horas, en comparación con 0,000 59 mSv/h a las 4.23 horas).

⁴⁶ La conclusión de la evacuación antes de iniciar el venteo se había acordado con las autoridades de la prefectura de Fukushima.

⁴⁷ En total se requirieron 14,5 horas para ejecutar la orden dada por el Superintendente del emplazamiento (alrededor de medianoche) de iniciar el venteo. Esto se debió a los altos niveles de radiación alrededor de la cámara de supresión, en que había que manipular manualmente las válvulas, y a la falta de aire comprimido para hacer funcionar las válvulas.

⁴⁸ A las 16.17 horas, el centro de respuesta a la emergencia observó que la medición de la radiación hecha a las 15.31 horas cerca de la entrada principal ascendía a 0,569 mSv/h, y esta información se comunicó a las autoridades a las 16.27 horas, porque este valor excedía del criterio de los 0,5 mSv/h fijado por ley para la notificación. Esta notificación fue corregida a las 16.53 horas, cuando se vio que el nivel de radiación medido a las 15.29 horas, es decir después del venteo de la Unidad 1 (pero antes de la explosión en dicha unidad) era de 1,015 mSv/h.

Cuando el nivel de agua alcanzó el punto de activación automática del sistema de inyección de refrigerante de alta presión —un sistema de refrigeración de emergencia del núcleo—, a las 12.35 horas, este sistema mantuvo automáticamente el nivel de agua del reactor en el rango predeterminado. Sin embargo, los operadores tomaron el control manual para evitar los repetidos arranques y paradas automáticos del sistema a fin de conservar la corriente continua por más tiempo, de conformidad con los procedimientos de respuesta a un apagón de la central.

Inyección de agua de mar y establecimiento de una línea de alimentación de energía eléctrica en la Unidad 1

Después de aproximadamente 11 horas de inyección de agua en el núcleo de la Unidad 1, el agua dulce del depósito para la protección contra incendios estaba casi agotada. Por consiguiente, a las 14.53 horas del 12 de marzo se interrumpió la inyección de agua dulce en la Unidad 1. El Superintendente del emplazamiento decidió entonces inyectar agua de mar en el reactor de la Unidad 1, tomándola del pozo de válvulas de lavado en contracorriente de la Unidad 3, donde se había acumulado agua de mar después del tsunami, ya que esa era la única fuente de agua disponible en ese momento. Los preparativos para la inyección de agua de mar se completaron en poco más de media hora.

Más o menos al mismo tiempo concluyeron los trabajos de conexión de los equipos móviles de suministro de energía eléctrica⁴⁹ a las Unidades 1 y 2 utilizando un transformador no dañado de la Unidad 2, y a las 15.30 horas del 12 de marzo se restableció el suministro de corriente alterna a la Unidad 1 con una red de baja tensión.

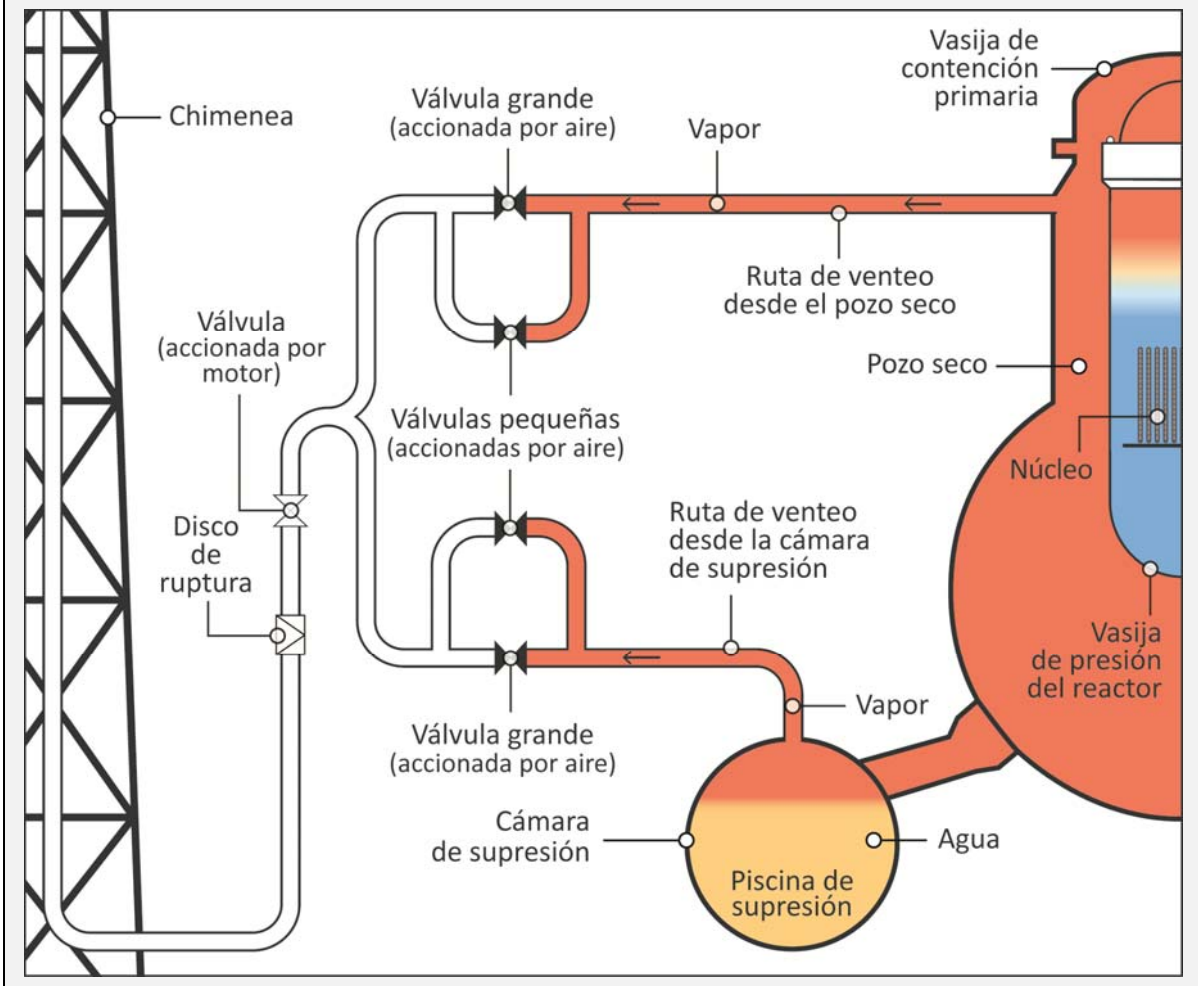
Cerca de 24 horas después del apagón de la central se conectaron a la Unidad 1 la inyección de agua de mar y la alimentación de corriente alterna. Sin embargo, pocos minutos después de la conexión, una explosión en el edificio del reactor de la Unidad 1 dañó estos dos dispositivos antes de que pudieran utilizarse.

⁴⁹ Cerca de una hora después del apagón del 11 de marzo, se despachó equipo móvil de alimentación eléctrica (vehículos de suministro de energía de baja y alta tensión) a los emplazamientos de las centrales nucleares de Fukushima Daiichi y Fukushima Daini. El primer vehículo, de Tohoku Electric, llegó alrededor de las 22.00 horas del 11 de marzo, es decir, cerca de seis horas después del apagón de la central. A lo largo de la noche fueron llegando a los emplazamientos más vehículos de otras instalaciones de la TEPCO y de Tohoku Electric y de la Fuerza de Autodefensa de Japón. A las 10.15 horas del 12 de marzo había en el emplazamiento un total de 23 vehículos.

Recuadro 2.3. Venteo de la contención

Como medida para mejorar la capacidad de hacer frente a accidentes severos, en los años noventa, en cumplimiento de una decisión de reglamentación [22, 23], se habían instalado en las unidades de la central nuclear de Fukushima Daiichi unos ‘respiraderos reforzados’ (es decir, dispositivos de alivio de la presión dotados de tuberías de descarga con paredes relativamente gruesas). El objetivo era prevenir la sobrepresurización de la contención primaria permitiendo el venteo (véase la figura a continuación). Aunque la ruta preferida de venteo partía de la cámara de supresión, para aprovechar la eliminación de radioisótopos por la piscina de agua, la vía de venteo incluía otra ruta que partía del pozo seco. Ambas rutas podían alinearse manipulando las válvulas desde la sala de control principal, controlando el volumen y la duración de la emisión a través de una chimenea compartida por cada par de unidades.

En la central nuclear de Fukushima Daiichi, la tubería de venteo incluía también un disco de ruptura que se fracturaría cuando la presión de la contención superara una presión predeterminada, evitándose así un venteo prematuro. El criterio de fondo aplicado en el Japón era el de no ventear hasta que fuera inevitable, y de hacerlo solo como último recurso para mantener la integridad de la contención primaria y retrasar o evitar la emisión directa de material radiactivo al medio ambiente.



Explosión en el edificio del reactor de la Unidad 1

A las 15.36 horas del 12 de marzo se produjo en la plataforma de servicio del edificio del reactor de la Unidad 1 una explosión que causó daños en la estructura superior del edificio e hirió a los trabajadores. Aunque al parecer la explosión no dañó la contención primaria, hubo extensos daños en la contención secundaria (el edificio del reactor). El personal de la central no pudo determinar la causa de la explosión, pero se sospechó que el núcleo había emitido hidrógeno, que había escapado de la contención primaria

por una vía desconocida. Por consiguiente, el centro de respuesta a la emergencia del emplazamiento pidió que se evacuara de las Unidades 1 a 4 y de las áreas circundantes, incluidas las dos salas de control principales comunes, a todo el personal, salvo los tres funcionarios de más alta categoría.

Aproximadamente tres horas después de la explosión en la Unidad 1 (cuatro horas después del veteo de la contención de esa unidad), a las 18.25 horas del 12 de marzo, el Gobierno amplió la zona de evacuación a un radio de 20 km.

Inyección de agua de mar en la Unidad 1

La explosión de la Unidad 1 no solo causó graves daños a los sistemas de inyección de agua de mar y las líneas de suministro temporal de energía eléctrica, sino que también dificultó su reparación debido a los escombros dispersos por el emplazamiento y a las altas tasas de dosis locales de los escombros contaminados. Tras una evacuación que duró aproximadamente dos horas, los grupos regresaron al lugar para reparar o sustituir el equipo dañado.

Una vez reparado y sustituido el equipo dañado, a las 19.04 horas del 12 de marzo se comenzó a inyectar agua en el reactor de la Unidad 1 con vehículos antiincendios y agua de mar tomada del pozo de válvulas de lavado en contracorriente de la Unidad 3⁵⁰. Más tarde, ante la preocupación de que se alcanzara nuevamente la criticidad, se añadió ácido bórico para asegurar la función de seguridad fundamental del control de la reactividad. En total, entre el final de la inyección de agua dulce y el comienzo de la inyección de agua de mar el núcleo de la Unidad 1 permaneció casi cuatro horas sin refrigeración.

Pérdida de la refrigeración del núcleo de la Unidad 3

Mientras que durante el primer día y medio después del terremoto y el tsunami se otorgó la máxima prioridad a la Unidad 1 con respecto al mantenimiento de las funciones de seguridad fundamentales, en la mañana del domingo 13 de marzo la situación de la refrigeración del núcleo de la Unidad 3 se convirtió en motivo de preocupación.

Después de 14 horas de funcionamiento continuo del sistema de emergencia de inyección de refrigerante a alta presión, los operadores de la Unidad 3 comenzaron a preocuparse por la fiabilidad y el posible fallo de la turbina del sistema que accionaba la bomba de inyección, que para entonces estaba funcionando con una baja presión de vapor del reactor. La preocupación se debía a la posibilidad de que se hubieran producido daños en la turbina y se hubiera creado una vía de emisión desde la vasija del reactor, lo cual produciría una emisión incontrolable de vapor radiactivo directamente hacia fuera de la contención primaria. Esta preocupación se agravó cuando la turbina no se detuvo automáticamente, como debería haberlo hecho según el diseño, al disminuir la presión del reactor por debajo del valor de cierre automático.

Por consiguiente, los operadores decidieron detener el sistema de inyección de refrigerante de alta presión y utilizar en cambio el medio alternativo de inyección a baja presión (la bomba de incendios accionada por un motor diésel). Los operadores pensaron que eso se podía lograr sin interrumpir la refrigeración del núcleo, puesto que la presión del reactor ya era inferior a la de la bomba de incendios en cuestión y podía mantenerse baja utilizando las válvulas de alivio de presión. Así pues, apagaron el sistema de emergencia de inyección del núcleo de alta presión de la Unidad 3 e iniciaron los intentos de abrir las válvulas de alivio de presión.

⁵⁰ En una ocasión, según las investigaciones realizadas [7], un ejecutivo de la TEPCO que representaba a la empresa en la Oficina del Primer Ministro pidió por teléfono al Superintendente del emplazamiento que detuviera la inyección de agua de mar en la Unidad 1. Esta directiva no se siguió y la inyección de agua de mar no se interrumpió.

Sin embargo, todos los intentos de abrir esas válvulas fracasaron y la presión del reactor subió rápidamente a un nivel superior a aquel en que podía efectuarse la inyección con la bomba de incendios accionada por el motor diésel, con lo cual el núcleo de la Unidad 3 quedó sin refrigeración, aproximadamente 35 horas después del apagón de la central. Ante este revés, los operadores intentaron durante casi 45 minutos volver a la inyección mediante el sistema de emergencia de inyección de refrigerante a alta presión, pero no lo consiguieron. En vista de la imposibilidad de refrigerar el reactor, a las 5.10 horas del 13 de marzo se emitió un informe de emergencia respecto de la Unidad 3 por ‘pérdida de la función de refrigeración del reactor’, conforme a la definición contenida en el reglamento relacionado con la Ley de Emergencias Nucleares [19]. En las horas siguientes, el núcleo de la Unidad 3 permaneció sin refrigeración, y esta unidad fue la siguiente en perder la refrigeración del núcleo.

Tras la pérdida de la refrigeración, a las 5.15 horas el Superintendente del emplazamiento ordenó el uso de un método alternativo de inyección de agua con vehículos antiincendios para enfriar el núcleo de la Unidad 3. En vista del deterioro de las condiciones, también ordenó que se alineara la ruta de venteo de la contención de la Unidad 3.

Refrigeración alternativa del núcleo y venteo de la contención de la Unidad 3

Los vehículos antiincendios de las Unidades 5 y 6 fueron enviados a la Unidad 3, y a las 5.21 horas del 13 de marzo comenzaron los trabajos para establecer una línea de inyección de agua de mar en el núcleo de la Unidad 3 a partir del pozo de válvulas de lavado en contracorriente de esa unidad por medio de las tuberías de protección contra incendios. A las 6.30 horas llegó otro vehículo antiincendios enviado desde la central nuclear de Kashiwazaki-Kariwa. La línea de inyección de agua de mar estuvo terminada al cabo de una hora. Sin embargo, el Superintendente aplazó su utilización, debido a una comunicación recibida de la sede de la TEPCO⁵¹. Como resultado de ello, la línea se volvió a cambiar a la fuente de agua dulce borada para la inyección a través de las tuberías de protección contra incendios utilizando los vehículos antiincendios.

Como parte de los esfuerzos por reducir la presión del reactor por debajo de la presión de la bomba del vehículo antiincendios a fin de mantener la inyección de agua, se activaron las válvulas de alivio de presión. Para ello se retiraron las baterías de corriente continua de los automóviles, que se trasladaron a la sala de control principal común de las Unidades 3 y 4.

Entretanto se trabajaba también en la tubería de venteo de la Unidad 3, que estuvo lista en poco más de tres horas, a las 8.41 horas del 13 de marzo, pero la presión de la contención era todavía inferior a la presión de diseño de esta estructura y no bastaba para fracturar el disco de ruptura de acuerdo con el diseño. Mientras continuaban los esfuerzos por reducir la presión del reactor abriendo la válvula de alivio y seguridad, a las 9.08 horas los operadores de la sala de control principal observaron una caída de presión en el reactor de la Unidad 3, aunque los indicadores del estado de las válvulas no permitían determinar con seguridad si las válvulas estaban en posición abierta o no. Junto con esta despresurización de la vasija del reactor hubo un aumento brusco de presión en la contención primaria, lo que indicó que se había producido una descarga de la vasija del reactor a la vasija de contención. Finalmente, a las 9.20 horas del 13 de marzo, la presión de la contención superó la presión de diseño máxima de esta estructura y a continuación bajó rápidamente, lo que indicó que se había producido el venteo de la contención de la Unidad 3 como consecuencia de la fractura del disco de ruptura.

⁵¹ Un director de división del Centro Externo para la emergencia, situado en la sede de la TEPCO, que había asistido anteriormente a una reunión en la Oficina del Primer Ministro, preguntó por teléfono al Superintendente del emplazamiento si se disponía aún de agua dulce, y le informó de las opiniones de los participantes en la reunión, que eran favorables a que la inyección de agua dulce prosiguiera durante todo el tiempo posible. El Superintendente del emplazamiento interpretó esta comunicación como una directiva de que no se inyectara agua de mar mientras hubiera agua dulce disponible.

Tras la despresurización del reactor, lograda mediante la apertura de válvulas de alivio y seguridad adicionales, la presión del reactor bajó a niveles inferiores a la presión de la bomba de los vehículos antiincendios y a las 9.25 horas se inició la inyección de agua dulce borada en el reactor de la Unidad 3, después de más de cuatro horas sin refrigeración.

El venteo de la contención de la Unidad 3 fue de corta duración, debido al cierre de una válvula⁵² de la tubería de venteo por falta de un flujo de aire suficiente para mantenerla abierta. Tras 6,5 horas de esfuerzos, se logró reabrir la válvula utilizando un compresor móvil.

Medidas precautorias adoptadas en la Unidad 2 para preservar las funciones de seguridad fundamentales

Hacia las 10.15 horas del 13 de marzo, al empeorar las condiciones para el mantenimiento de las funciones de seguridad fundamentales pertinentes en las Unidades 1 y 3, el Superintendente del emplazamiento ordenó que se estableciera preventivamente una ruta de venteo de la contención de la Unidad 2. La intención era aprovechar las condiciones radiológicas todavía favorables en comparación con las de las otras unidades y con la tendencia en todo el emplazamiento⁵³ para trabajar en el edificio del reactor de la Unidad 2 donde había que manipular válvulas. Los trabajos se llevaron a cabo en 45 minutos, pero el venteo no se produjo porque la presión dentro de la contención de la Unidad 2 no era suficiente para fracturar el disco de ruptura.

Hacia las 12.05 horas, el Superintendente del emplazamiento ordenó también que se realizaran preparativos de carácter precautorio para inyectar agua de mar en la Unidad 2 en caso de que fallara el sistema de refrigeración de la unidad que estaba operativo. Con este fin se conectaron vehículos antiincendios a las tuberías de protección contra incendios de la Unidad 2, para inyectar agua a partir del pozo de válvulas de lavado en contracorriente de la Unidad 3, si fuera necesario.

Inyección de agua de mar en la Unidad 3 y aumento de los niveles de radiación

Cuando se agotó el agua dulce de los depósitos de protección contra incendios, a las 12.20 horas del 13 de marzo, el Superintendente del emplazamiento decidió inyectar agua de mar en el reactor de la Unidad 3. Se reposicionaron los vehículos antiincendios, y cerca de una hora después, a las 13.12 horas, comenzó la inyección de agua de mar a partir del pozo de válvulas de lavado en contracorriente de la Unidad 3.

A las 14.15 horas del 13 de marzo se midió una alta tasa de dosis de radiación (de casi 1 mSv/h) cerca de los límites del emplazamiento, y a las 14.23 horas se notificó a los organismos gubernamentales competentes la existencia de un 'aumento anormal del nivel de radiación en los límites del emplazamiento', conforme a la definición contenida en el reglamento relacionado con la Ley de Emergencias Nucleares [19]. Quince minutos más tarde, la tasa de dosis de radiación superaba los 100 a 300 mSv/h en las puertas de entrada del edificio del reactor de la Unidad 3. Como las tasas de dosis medidas en la parte correspondiente a la Unidad 3 de la sala de control principal común de las Unidades 3 y 4 excedían de 12 mSv/h, el equipo de turno se desplazó a la parte de la Unidad 4.

El centro de respuesta a la emergencia del emplazamiento dedujo, a partir de estos niveles de dosis, que habían escapado gases radiactivos del reactor de la Unidad 3, lo que a su vez significaba que había escapado también hidrógeno. Consciente de que podía producirse una explosión de hidrógeno similar a la que había ocurrido en la Unidad 1, a las 14.45 horas el Superintendente del emplazamiento decidió evacuar temporalmente a los trabajadores de la sala de control principal común de las Unidades 3 y 4 y de las zonas cercanas a la Unidad 3.

⁵² Como se descubrió dos horas más tarde.

⁵³ Entre las 5.30 y las 10.50 horas del 13 de marzo se detectaron neutrones a una distancia de alrededor de 1 km de los edificios de los reactores de las Unidades 1 a 4, cerca de la entrada principal, lo que indicaba una posible fractura de la vasija de contención, aunque la fuente de los neutrones no se conocía.

Las zonas evacuadas incluían también el área del pozo de válvulas de lavado en contracorriente de la Unidad 3, con lo cual se detuvieron las actividades de inyección de agua. La orden de evacuación se levantó a las 17.00 horas, y los trabajadores regresaron a la zona del pozo de válvulas de lavado en contracorriente de la Unidad 3 para continuar las actividades de inyección de agua y de venteo.

Establecimiento de la refrigeración del núcleo en la Unidad 5

Mientras tanto, a las 20.48 horas del 13 de marzo se efectuó la conexión de la corriente eléctrica del generador diésel de emergencia de la Unidad 6 a la bomba del sistema normal, de baja presión, de evacuación del calor de la Unidad 5, que se activó a las 20.54 horas. A través de uno de los dos sistemas de evacuación del calor residual se alineó una tubería de inyección de agua en el reactor de la Unidad 5 y, 53 horas después del apagón de la central, se abrieron las válvulas de los tubos de interconexión con el sistema de condensado de agua de aporte. Sin embargo, la inyección de agua no se llevó a efecto, porque la presión del reactor había aumentado gradualmente y superaba la presión de inyección. En vista de ello, se abrió una válvula de alivio y seguridad, utilizando los suministros de corriente continua y de nitrógeno disponibles. Ello permitió reducir la presión en la vasija de presión del reactor y comenzar a inyectar agua en el reactor de la Unidad 5 a las 5.30 horas del 14 de marzo.⁵⁴

Pérdida de la refrigeración con agua de mar en las Unidades 1 y 3

Con la inyección continua de agua de mar en las Unidades 1 y 3 a partir del pozo de válvulas de lavado en contracorriente de la Unidad 3, al comienzo del lunes 14 de marzo el nivel del agua del pozo había bajado tanto que a las 1.10 horas hubo que detener la inyección. Después de bajar el tubo de toma de agua del pozo a una profundidad mayor, el agua restante en el pozo se reservó para la inyección en la Unidad 3, que se reanudó dos horas más tarde. La refrigeración del núcleo de la Unidad 1 se aplazó hasta que pudiera reponerse el agua del pozo.

En las horas siguientes se observó que la presión de la contención de la Unidad 3 estaba aumentando, mientras que la indicación del nivel de agua del reactor seguía disminuyendo. El nivel de agua del reactor de la Unidad 3 dio un valor fuera de escala a las 6.20 horas del 14 de marzo, lo que indicó a los operadores que el núcleo se había descubierto. El Superintendente del emplazamiento ordenó la evacuación de todos los trabajadores por temor a una posible explosión de hidrógeno en la Unidad 3, deteniendo las actividades de reposición del agua del pozo.

La presión de la contención de la Unidad 3 alcanzó un nivel máximo a las 7.00 horas, pero a las 7.20 horas había disminuido ligeramente. A partir de ese momento se mantuvo estable por debajo de la presión máxima de diseño. El Superintendente del emplazamiento decidió entonces reanudar los trabajos de tendido de una tubería para rellenar el pozo de válvulas de lavado en contracorriente con agua del océano. En las dos a cuatro horas siguientes se restablecieron las líneas de inyección de agua de mar de todas las unidades y se inició la reposición del agua del pozo, utilizando dos vehículos antiincendios adicionales para bombear agua del océano, y camiones cisterna de la Fuerza de Autodefensa del Japón, que llegaron al emplazamiento a las 10.26 horas, para transportar el agua hasta el pozo.

Cuando todo estaba listo para reanudar la inyección de agua de mar en la Unidad 1, hubo que detener todas las actividades, incluida la inyección de agua de mar en el reactor de la Unidad 3, que estaba en curso, a causa de la explosión en la Unidad 3. Esta explosión dañó las mangueras y los vehículos antiincendios que se encontraban en torno al pozo de válvulas de lavado en contracorriente de la Unidad 3 e hizo necesaria la evacuación temporal de los trabajadores de las zonas exteriores.

⁵⁴ Además, el generador diésel de emergencia de la Unidad 6 suministró corriente alterna para hacer funcionar el sistema de control de la presión en el edificio del reactor. Poco más de dos días después del apagón, la presión en el edificio del reactor era inferior a la presión atmosférica, garantizándose así el confinamiento secundario.

Explosión en el edificio del reactor de la Unidad 3

A las 11.01 horas del 14 de marzo se produjo una explosión en la parte superior del edificio del reactor de la Unidad 3, que destruyó la estructura por encima de la plataforma de servicio e hirió a los trabajadores. Además de destruirse el mecanismo alternativo de inyección de agua, se perdió también la capacidad de venteo de la contención de la Unidad 2, ya que la explosión afectó a la ruta de venteo de la contención de esa unidad que se había establecido anteriormente. Tras la explosión, se descubrió que la válvula de aislamiento de la tubería de venteo de la Unidad 2 estaba cerrada, y no fue posible reabrirla.

Reanudación de la refrigeración con agua de mar en las Unidades 1 y 3

Tras una interrupción de dos horas, se reanudaron los trabajos para restablecer la línea de inyección de agua de mar, esta vez directamente desde el océano. Una vez restablecidas las líneas de inyección, se reinició la inyección de agua de mar primero en la Unidad 3, en la tarde del 14 de marzo, y luego en la Unidad 1, al atardecer del mismo día. Los núcleos habían permanecido sin inyección de agua de refrigeración por 5 horas, en el caso de la Unidad 3, y por 18 horas, en el de la Unidad 1.

Pérdida de la refrigeración e inyección de agua de mar en la Unidad 2

Aproximadamente a las 13.00 horas del 14 de marzo, la Unidad 2 experimentó a su vez una pérdida de la refrigeración, con mediciones que indicaban que el nivel de agua del reactor había disminuido y que la presión del reactor había aumentado. Esto hizo pensar a los operadores de la Unidad 2 y al centro de respuesta a la emergencia del emplazamiento que podía haber fallado el sistema de refrigeración del núcleo del reactor aislado de esa unidad. Por consiguiente, se emitió una notificación de ‘pérdida de la función de refrigeración del reactor’, conforme a las definiciones contenidas en el reglamento relacionado con la Ley de Emergencias Nucleares [19], respecto de la Unidad 2.

Tras el fallo del sistema de refrigeración del núcleo del reactor aislado, a las 13.05 horas se intentó inyectar agua de mar a través del sistema de protección contra incendios, pero la presión del reactor era demasiado alta para las bombas de los vehículos antiincendios. Como parecía probable que sin inyección de agua el núcleo quedaría descubierto muy pronto, se decidió utilizar las válvulas de alivio para despresurizar el reactor y poder así inyectar agua a baja presión, teniendo presentes al mismo tiempo los efectos adversos que pudieran producirse en el confinamiento como consecuencia de la emisión de vapor del reactor a la contención.⁵⁵

Tras la despresurización de la vasija del reactor y la recarga de los vehículos antiincendios, se inició, poco antes de las 20.00 horas del 14 de marzo, la inyección de agua de mar en la Unidad 2 a través del sistema de protección contra incendios, primero con un solo vehículo antiincendios y un poco más tarde con dos.

Degradación del confinamiento de la Unidad 2

Alrededor de las 21.55 horas del 14 de marzo, el equipo de monitorización radiológica dentro de la contención, que se había restaurado poco antes, indicó que los niveles de radiación en la contención de la Unidad 2 habían aumentado sustancialmente desde las últimas mediciones efectuadas ocho horas

⁵⁵ La sección de la cámara de supresión de la vasija de contención primaria ya estaba casi saturada.

antes.⁵⁶ Además, a las 22.30 horas del 14 de marzo las presiones del reactor y de la contención empezaron a mostrar una tendencia ascendente. A las 22.50 horas, la presión de la contención superó el valor de diseño, motivando la emisión de una declaración de emergencia por ‘aumento anormal de la presión en la vasija de contención’, de conformidad con el reglamento relacionado con la Ley de Emergencias Nucleares [19], respecto de la Unidad 2. Esta condición se notificó a las autoridades gubernamentales competentes a las 23.39 horas. En las tres a cuatro horas siguientes se abrieron más válvulas de alivio para reducir la presión del reactor y poder inyectar agua en el reactor de la Unidad 2. Como consecuencia de ello, la presión de la contención aumentó aún más, mientras el grupo de operaciones de la unidad encargado de establecer la ruta de venteo para aliviar la presión de la contención intentaba en vano abrir las válvulas de venteo. Para proteger la función del confinamiento y poder realizar el venteo lo antes posible, el personal de la TEPCO de los centros de respuesta a la emergencia dentro y fuera del emplazamiento acordó ventear directamente desde el pozo seco, siendo consciente de que ello aumentaría las emisiones radiactivas al medio ambiente. Sin embargo, no fue posible abrir las válvulas del respiradero del pozo seco, y el venteo de la Unidad 2 no se pudo realizar.

A las 4.17 horas del martes 15 de marzo se notificó a los organismos gubernamentales competentes que la despresurización de la contención de la Unidad 2 y del reactor no había sido posible y que la presión de la contención seguía aumentando.

Sucesos en las Unidades 2 y 4 y evacuación posterior del emplazamiento

A las 6.14 horas del 15 de marzo se oyó una explosión en el emplazamiento y se sintieron temblores en la sala de control principal común de las Unidades 1 y 2, después de lo cual se registró una caída del valor de la presión en la contención de la Unidad 2 (la cámara de supresión). El personal de la sala de control principal comunicó inicialmente al centro de respuesta a la emergencia del emplazamiento que la presión de la cámara de supresión de la Unidad 2 había bajado casi al nivel de la presión atmosférica⁵⁷, lo que indicaría la posible pérdida de la función del confinamiento.

Esta información indicaba un posible fallo de la vasija de contención y la posibilidad de que hubiera emisiones no controladas de la Unidad 2. Sobre esa base, el centro de respuesta a la emergencia del emplazamiento ordenó una evacuación temporal de todo el personal de todas las unidades al edificio sísmicamente aislado, donde se encontraba el centro de respuesta a la emergencia del emplazamiento. Aproximadamente al mismo tiempo que se producía el suceso relacionado con la cámara de supresión de la Unidad 2, el personal que estaba evacuando el lugar notificó que había habido una explosión en la parte superior del edificio del reactor de la Unidad 4.

Tras los sucesos de las Unidades 2 y 4, el Superintendente del emplazamiento impartió la instrucción de que todo el personal, salvo el que fuera necesario para la monitorización y la respuesta de emergencia, se dirigiera a un lugar radiológicamente seguro. Aproximadamente 650 personas entendieron esta instrucción como una orden de evacuación del emplazamiento y se trasladaron a la central nuclear de Fukushima Daini. Se estima que entre 50 y 70 personas⁵⁸, entre ellas el Superintendente del emplazamiento, permanecieron en el emplazamiento de Fukushima Daiichi. Los organismos gubernamentales competentes fueron informados de la evacuación por el centro de respuesta a la emergencia del emplazamiento a las 7.00 horas del 15 de marzo.

⁵⁶ Un aumento en 5000 veces de los niveles de radiación en la atmósfera de la contención (de 1,08 mSv/h a 5360 mSv/h) y un aumento en 40 veces de los niveles de radiación en la sección de la piscina de supresión de la contención (de 10,3 mSv/h a 383 mSv/h). Además, a las 21.00 horas del 14 de marzo y a las 1.40 horas del 15 de marzo se habían detectado neutrones, nuevamente cerca de la entrada principal. La TEPCO pensó que los neutrones procedían de la fisión espontánea de los actínidos emitidos tras el daño sufrido por el núcleo de uno de los tres reactores.

⁵⁷ Tras controlar nuevamente los valores registrados, se confirmó que la presión de la cámara de supresión estaba fuera de escala, pero que la presión de la sección del pozo seco no había disminuido considerablemente en la Unidad 2.

⁵⁸ Como se indicó en diferentes informes de investigación, el número exacto de personas no se conoce con certeza [6, 8]. También se indicó que el personal evacuado al emplazamiento de la central nuclear de Fukushima Daini empezó a regresar al emplazamiento de la central nuclear de Fukushima Daiichi ese mismo día.

Alrededor de dos horas más tarde, se vio salir humo blanco (o vapor) del edificio del reactor de la Unidad 2, cerca del quinto piso. A las 9.00 horas del 15 de marzo se registró en la entrada principal una tasa de dosis de radiación de casi 12 mSv/h, la medición más alta desde el principio del accidente. Debido a los altos niveles de radiación, dos horas más tarde, a las 11.00 horas, las autoridades gubernamentales emitieron una orden en que se pedía a todos los residentes en un radio de 20 a 30 km en torno a la central nuclear de Fukushima Daiichi que permanecieran en sus casas y no salieran al exterior.

Durante esta secuencia de sucesos, se perdieron o sufrieron una degradación severa varias funciones de seguridad fundamentales en las Unidades 1 a 3 (figura 2.5), y los esfuerzos se centraron en evaluar los daños y en recuperar y estabilizar esas funciones.

2.1.3. Esfuerzos de estabilización

Reposición del agua en la piscina de combustible gastado de las Unidades 3 y 4

El miércoles 16 de marzo por la tarde se realizó una inspección visual a distancia desde un helicóptero, ante la preocupación por el estado de las piscinas de combustible gastado de las Unidades 3 y 4. La inspección confirmó que en la piscina de combustible gastado de la Unidad 4 había suficiente agua para cubrir los conjuntos combustibles; en cambio, las observaciones no fueron concluyentes para la piscina de combustible gastado de la Unidad 3, por lo que su relleno se convirtió en una alta prioridad.

El primer suministro de agua a la piscina de combustible gastado de la Unidad 3 se realizó entre las 9.30 y las 10.00 horas del 17 de marzo rociando agua de mar desde helicópteros. Más tarde, entre las 19.05 y las 20.07 horas del mismo día, se roció agua dulce utilizando carros hidrantes. En la piscina de combustible gastado de la Unidad 4 el rociado de agua de mar o agua dulce comenzó el 20 de marzo⁵⁹.

Para asegurarse de que el combustible gastado no quedara expuesto, el rociado de las piscinas continuó intermitentemente durante el mes de marzo, utilizando carros hidrantes, camiones de bomberos o vehículos con bombas para impeler hormigón. En abril y buena parte de mayo de 2011 se utilizó también el sistema de purificación y refrigeración de la piscina de combustible.

Restablecimiento del suministro eléctrico y término del apagón de la central

Entre el 17 y el 20 de marzo se trabajó en el tendido de cables de energía eléctrica temporales hasta las Unidades 1 y 2. El domingo 20 de marzo, a las 15.46 horas, casi exactamente nueve días después del apagón de la central, se restableció el suministro eléctrico exterior en las Unidades 1 y 2 mediante este sistema temporal de abastecimiento de corriente alterna que puso fin al apagón en esas unidades.

En la Unidad 6, el suministro eléctrico del sistema de refrigeración del segundo generador diésel de emergencia refrigerado por agua se restableció creando una conexión con el generador refrigerado por aire que estaba operativo. El generador diésel de emergencia refrigerado por agua comenzó a funcionar nuevamente a las 4.22 horas del 19 de marzo, suministrando corriente alterna a las Unidades 5 y 6.

El apagón en las Unidades 3 y 4 terminó después de más de 14 días, cuando se restableció temporalmente el suministro eléctrico exterior a estas dos unidades, el 26 de marzo.

⁵⁹ Este método se utilizó también para añadir agua a la piscina de combustible gastado de la Unidad 1. Puesto que en la Unidad 2 el edificio del reactor aún cubría la piscina de combustible gastado, el método del rociado no se pudo utilizar para esa unidad.

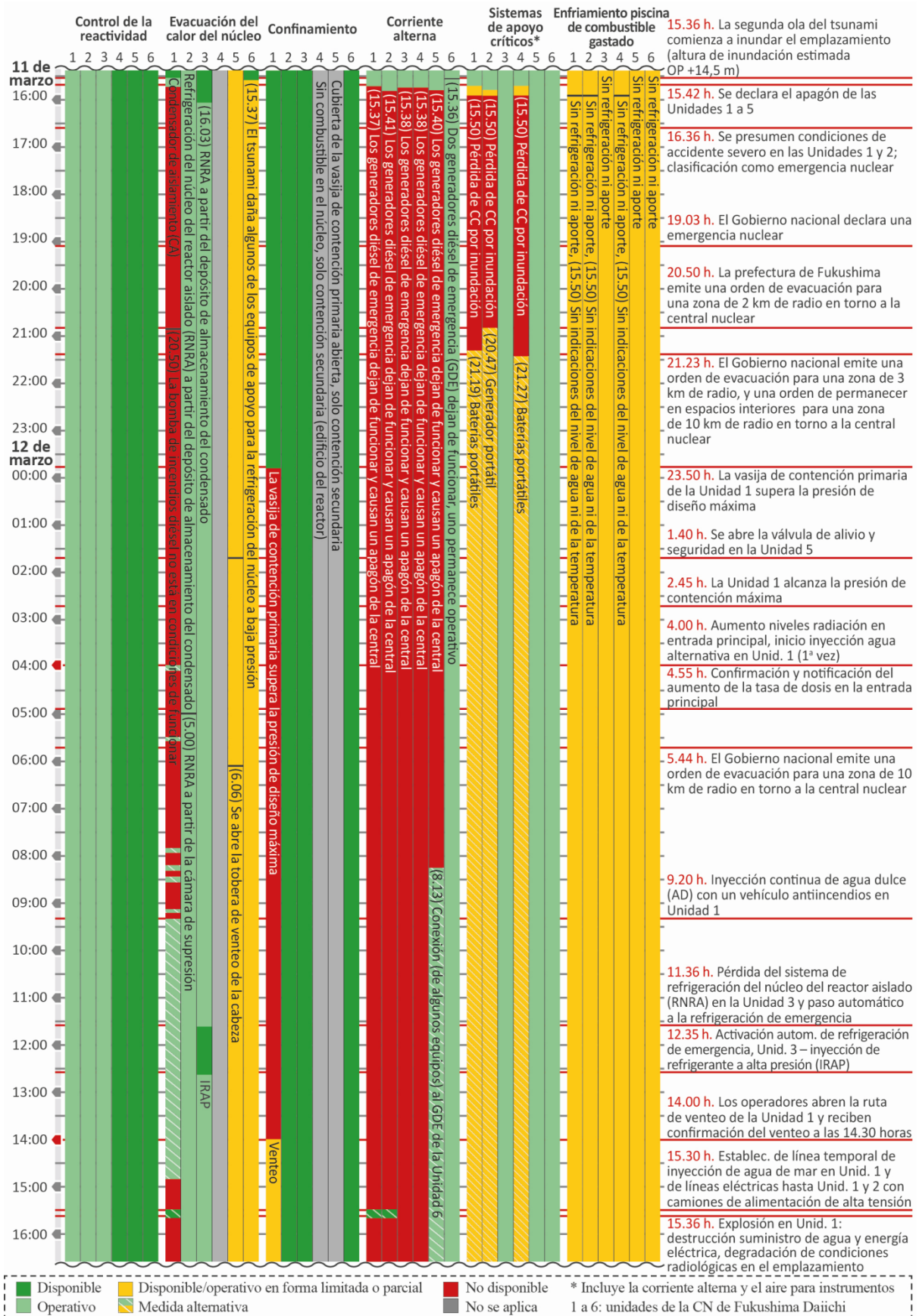


Fig. 2.5. Funciones de seguridad fundamentales y de apoyo en la respuesta al accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi (11 a 15 de marzo de 2011).

La hoja de ruta establecía dos condiciones que definirían el término del estado de accidente, o el ‘estado de parada fría’⁶⁰: el logro de una supresión considerable de las emisiones radiológicas y la disminución constante de las tasas de dosis de radiación; y el logro de los valores objetivo de algunos parámetros de la central prescritos en la hoja de ruta. El 19 de julio el Gobierno del Japón y la TEPCO anunciaron que la primera condición se había cumplido en las Unidades 1 a 3, y el 16 de diciembre de 2011 anunciaron que se había cumplido también la segunda condición en esas unidades. Este anuncio puso fin oficialmente⁶¹ a la fase de ‘accidente’ de los sucesos en la central nuclear de Fukushima Daiichi.

Sin embargo, en la central persistían algunas condiciones inestables, por ejemplo fluctuaciones de las temperaturas, que se habían explicado aduciendo fallos en la instrumentación, o fluctuaciones en la medición de los productos de fisión. Entre marzo y abril de 2012 se alcanzaron parámetros más estables, mientras seguían los esfuerzos de gestión posterior al accidente. Además, prosiguieron los desafíos de la gestión de los desechos, por ejemplo las dificultades para hacer frente a la acumulación de agua radiactiva debido a la entrada de agua subterránea a los edificios y algunos fallos ocasionales del equipo. Cuando se redactó el informe, el Gobierno del Japón consideraba la central nuclear de Fukushima Daiichi una ‘instalación especificada como lugar de un accidente’⁶².

2.2. CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD NUCLEAR

2.2.1. Vulnerabilidad de la central a sucesos externos

El terremoto del 11 de marzo de 2011 causó un movimiento vibratorio de la tierra que sacudió las estructuras, los sistemas y los componentes de la central. Le siguieron una serie de olas de tsunami, una de las cuales inundó el emplazamiento. Tanto los movimientos de la tierra registrados como las alturas de las olas del tsunami excedieron considerablemente de los supuestos relativos a los peligros que se habían postulado al diseñar la central. El terremoto y el tsunami conexo afectaron a múltiples unidades de la central nuclear de Fukushima Daiichi.

En el diseño originario, el peligro sísmico y las olas de tsunami considerados se habían evaluado principalmente sobre la base de los registros sísmicos históricos y de los datos sobre tsunamis recientes en el Japón. En esta evaluación originaria no se tuvieron suficientemente en cuenta los criterios tectónico-geológicos y no se realizó ninguna reevaluación de dichos criterios.

Antes del terremoto, la Fosa de Japón estaba clasificada como una zona de subducción con frecuentes terremotos de magnitud 8; los científicos japoneses no consideraban creíble que se pudiera producir un terremoto de magnitud 9,0 frente a la costa de la prefectura de Fukushima. Sin embargo, en diferentes zonas con entornos tectónicos parecidos se habían registrado terremotos de magnitudes de ese orden o superiores en los decenios precedentes.

No hubo ninguna indicación de que las principales características de seguridad de la central se vieran afectadas por los movimientos vibratorios de la tierra generados por el terremoto del 11 de marzo de 2011. Ello se debió al enfoque prudente aplicado en el Japón con respecto a los terremotos al diseñar y construir centrales nucleares, lo que dio lugar a una central con márgenes de seguridad suficientes. No obstante, las consideraciones del diseño originario no preveían márgenes de seguridad comparables para sucesos de inundación externa extremos, como los tsunamis.

⁶⁰ La expresión ‘estado de parada fría’ fue definida en ese momento por el Gobierno del Japón específicamente para los reactores de Fukushima Daiichi. Esa definición difiere de la terminología empleada por el OIEA y por otros.

⁶¹ Según los criterios fijados por el Gobierno del Japón en ese momento.

⁶² De conformidad con la definición de una ‘instalación nuclear especificada’, a saber, una instalación que requiere medidas especiales de seguridad o protección física de materiales nucleares especificados, establecida por el órgano regulador actual, la Autoridad de Reglamentación Nuclear, el 7 de noviembre de 2012.

La vulnerabilidad de la central de Fukushima Daiichi a los peligros externos no se había revaluado de manera sistemática y completa en sus años de existencia. En la época del accidente no existían en el Japón requisitos reglamentarios a ese respecto, y los reglamentos y directrices vigentes no tenían adecuadamente en cuenta la experiencia operativa pertinente a nivel nacional e internacional. Las directrices reglamentarias en el Japón sobre los métodos para hacer frente a los efectos de los sucesos asociados con los terremotos, como los tsunamis, eran genéricas y breves y no proporcionaban criterios específicos u orientación detallada.

Antes del accidente, la entidad explotadora había realizado algunas revaluaciones de los niveles de inundación que podía provocar un tsunami extremo, utilizando una metodología basada en el consenso que se había desarrollado en el Japón en 2002, y había obtenido valores más altos que las estimaciones empleadas inicialmente como base de diseño. En vista de ello, se habían adoptado algunas medidas compensatorias, pero estas demostraron ser insuficientes cuando se produjo el accidente.

Además, antes del accidente la entidad explotadora había realizado varios cálculos de pruebas utilizando modelos de fuentes de ondas o metodologías que iban más allá de la metodología basada en el consenso. Así, un cálculo de prueba con un modelo de fuente propuesto por la Oficina Central de Promoción de la Investigación sobre los Terremotos del Japón en 2002, que utilizaba la información más reciente y un enfoque diferente en sus escenarios, había previsto un tsunami considerablemente mayor que el postulado en el diseño inicial y en las estimaciones hechas en las revaluaciones posteriores. En la época del accidente se estaban llevando a cabo nuevas evaluaciones, pero entretanto no se había aplicado ninguna medida compensatoria adicional. Los valores estimados eran similares a los niveles de inundación que se registraron en marzo de 2011.

En la experiencia operativa mundial se han observado casos en los que los peligros naturales han sobrepasado la base de diseño para una central nuclear. En particular, la experiencia adquirida de algunos de esos sucesos demostró la vulnerabilidad de los sistemas de seguridad a las inundaciones.

Recuadro 2.4. Tsunamis [25]

Un maremoto o tsunami —término que en japonés significa ola (‘nami’) de puerto (‘tsu’)— es una serie de ondas progresivas de longitud de onda larga (de algunos kilómetros a cientos de kilómetros) y de período largo (de varios minutos a decenas de minutos y, excepcionalmente, de horas), generada por la deformación o perturbación del lecho marino (o, en términos genéricos, del suelo sumergido). Un maremoto puede ser causado por un terremoto, fenómenos volcánicos, corrimientos de tierras subacuáticos y costeros, derrumbes de montañas o el colapso de un acantilado. Los maremotos pueden producirse en todas las regiones oceánicas y cuencas marinas del mundo, e incluso los fiordos y los grandes lagos.

Las olas del tsunami se propagan a partir de la zona generatriz en todas las direcciones, y la dirección principal de propagación de la energía viene determinada por las dimensiones y la orientación de la fuente generadora. Durante su propagación en aguas profundas, las olas de un maremoto se comportan como olas de gravedad ordinarias y su velocidad depende de la profundidad del agua. Por ejemplo, en el océano profundo las velocidades pueden superar los 800 km/h, con una altura de ola que generalmente no excede de algunas decenas de centímetros y, cuando la fuente es un terremoto, con longitudes de onda que a menudo superan los 100 km. Durante la propagación, la topografía submarina afecta a la velocidad y la altura de la ola del tsunami. La refracción, la reflexión desde un promontorio submarino o una cadena de montes marinos (archipiélago) y la difracción son factores que influyen de manera importante en la propagación de las olas de un maremoto en aguas profundas.

Las olas del tsunami se vuelven más altas y empinadas al aproximarse a las aguas someras porque la velocidad de la ola se reduce y la longitud de onda se acorta al disminuir la profundidad. En una zona costera, la topografía y batimetría local, por ejemplo la presencia de una península o un cañón submarino, pueden causar un aumento adicional de la altura de las olas que puede amplificarse también por la presencia de una bahía, un estuario, un puerto marítimo o una laguna costera en forma de embudo, a medida que el tsunami penetra en la tierra. Pueden producirse varias olas grandes, y la primera puede no ser la mayor. Antes de la primera ola, y entre cada una de las inundaciones consecutivas, también puede haber un retroceso del mar. Un maremoto es capaz de inundar la tierra porque su longitud de onda es tan larga, que detrás del frente de onda viene una inmensa masa de agua. Esto puede tener un efecto destructivo.

Las normas de seguridad del OIEA en vigor en la época del accidente exigían que, antes de construir una central nuclear, se determinaran los peligros externos específicos del emplazamiento, como los terremotos y maremotos, y se evaluaran sus posibles efectos en la central nuclear, como parte de la caracterización amplia y completa del emplazamiento [26]. Se deben establecer bases de diseño adecuadas para ofrecer márgenes de seguridad suficientes durante toda la vida útil de la central nuclear [27]. Estos márgenes tienen que ser suficientemente grandes para dar cabida al elevado nivel de incertidumbre que entraña la evaluación de los sucesos externos. También deben reevaluarse periódicamente los peligros relacionados con el emplazamiento a fin de determinar si es necesario algún cambio como resultado de la obtención de nuevas informaciones y conocimientos durante la vida útil de la central [26].

En los años sesenta y setenta, era una práctica internacional común utilizar los registros históricos al aplicar métodos para estimar los peligros sísmicos y los peligros concomitantes (por ejemplo, de tsunami). En esta práctica común, los márgenes de seguridad se aumentaban utilizando una magnitud o intensidad sísmica superior al valor máximo registrado históricamente en la región del emplazamiento y suponiendo que el suceso de esa magnitud o intensidad se produjera a la distancia más próxima posible de este [28]. De ese modo se daba cabida a las incertidumbres en las observaciones de las intensidades o magnitudes, y se compensaba el hecho de que los valores máximos posibles podían no haberse alcanzado en un período de observación relativamente breve, ya que típicamente el período de observación debía incluir datos prehistóricos para poder hacer estimaciones robustas que permitieran evaluar el peligro. Sin embargo, la evaluación del peligro sísmico para el diseño de las Unidades 1 y 2 de la central nuclear de Fukushima Daiichi se realizó principalmente sobre la base de los datos sísmicos históricos regionales, sin aumentar los márgenes de seguridad de la forma arriba descrita. Durante el proceso de obtención de los permisos de construcción para las unidades posteriores, se aplicó una nueva metodología consistente en una combinación de la información sísmica histórica con las dimensiones geomorfológicas de la falla [16, 29].

La información relativa a las fallas ‘continentales’ se tomó de fuentes oficiales y de prospecciones específicas realizadas por la entidad explotadora, y en el análisis para predecir la magnitud de un posible terremoto se aplicaron parámetros prudentes. Para la Fosa de Japón, se estimó inicialmente, i) sin una justificación tectónica suficiente y ii) sin tener en cuenta los casos análogos de otras partes del mundo, sino basándose principalmente en los datos históricos observados, que un terremoto de magnitud 8 era el suceso máximo que podía ocurrir.

En otras partes del ‘cinturón de fuego’ del Pacífico se habían producido terremotos de gran magnitud (M 9), por ejemplo los de Chile en 1960 y de Alaska en 1964, poco antes de que se concediera la licencia de construcción para la Unidad 1 de Fukushima Daiichi. Pese a estos terremotos, los sismólogos japoneses no alcanzaron ningún consenso en el sentido de que un suceso de esa magnitud fuera posible cerca de las costas del Japón, cuyo entorno tectónico era parecido al que generaba terremotos en otras zonas de la placa tectónica del Pacífico.

En la evaluación inicial de los peligros de inundación externa utilizada en el ‘permiso de establecimiento’ de la central, los diseñadores de esta aplicaron la metodología y los criterios imperantes en el Japón en esa época, que se basaban en el estudio y la interpretación de los registros históricos de terremotos y tsunamis. El tsunami distante que se había producido tras uno de los terremotos más grandes registrados en el mundo, el de Chile de 1960, fue el suceso utilizado para el diseño con respecto a las inundaciones externas. Ese terremoto había provocado un tsunami que había llegado al Puerto de Onahama, en la prefectura de Fukushima, con una altura de 3,1 m sobre el nivel del mar.

En cuanto a las fuentes de tsunamis situadas en la Fosa de Japón frente a la costa oriental, se carecía de registros históricos de los niveles de inundación provocados por maremotos en el lugar del emplazamiento de Fukushima Daiichi, y también de datos de terremotos que hubieran tenido su epicentro en el mar frente al emplazamiento. La ausencia de datos sobre fuentes de tsunamis cercanos respaldó la adopción de un nivel máximo de inundación de 3,1 m para el diseño. La TEPCO no tomó en consideración los terremotos de gran magnitud que habían ocurrido en otras partes y no los postuló como fuentes de un tsunami local en la Fosa de Japón.

Pese a la falta de prescripciones reglamentarias en el Japón respecto de la realización de revaluaciones de los peligros sísmicos y de tsunamis, la TEPCO había efectuado varias revaluaciones a lo largo del tiempo de vida de la central nuclear de Fukushima Daiichi [30]. La TEPCO y otras organizaciones explotadoras del Japón habían revaluado los niveles de inundación que podía provocar un tsunami utilizando una metodología desarrollada por la Sociedad de Ingenieros Civiles del Japón y publicada en 2002 [31]. Esa metodología utilizaba un modelo de fuente estándar para los tsunamis cercanos o locales, basado en los datos históricos, en que se suponía que a lo largo de la Fosa de Japón, en el mar frente al emplazamiento de Fukushima Daiichi, no se produciría ningún terremoto que pudiera generar un tsunami. Esta hipótesis del modelo de fuente estándar se había aplicado en todas las evaluaciones realizadas con esa metodología.

En las directrices de 2006 de la Comisión de Seguridad Nuclear del Japón [32] se estableció el requisito de que se tomaran en consideración los terremotos que ocurren en los límites entre las placas tectónicas, así como los que se producen en el interior de estas. Estas directrices sobre la seguridad sísmica y los sucesos conexos se habían utilizado para evaluar los peligros sísmicos, pero en el caso de los peligros de tsunami las directrices solo contenían declaraciones genéricas y breves y no establecían metodologías, requisitos o criterios específicos. Estos terremotos fueron considerados por la TEPCO como terremotos de magnitud 8 en su ‘comprobación retrospectiva’ de la seguridad sísmica, conforme a lo exigido por el Organismo de Seguridad Nuclear e Industrial (OSNI). Sin embargo, debido a la distancia del emplazamiento de esos terremotos interplaca, el método arrojó valores de riesgo menores para esta estructura tectónica que para las fuentes de sismos dentro de las placas. En consecuencia, su efecto en el peligro de movimiento de la tierra no se tuvo en cuenta. Cuando se produjo el accidente, la TEPCO no había finalizado la reevaluación de la vulnerabilidad de la central a los terremotos y los tsunamis.

En 2009, la TEPCO había estimado en un valor de 6,1 m la altura máxima que podía alcanzar un tsunami, basándose en los datos más recientes de la batimetría y las mareas. Como resultado de esta nueva estimación se habían hecho algunos cambios en el diseño de la central nuclear de Fukushima Daiichi, y en particular se habían elevado los motores de las bombas utilizadas para evacuar el calor residual. Durante el accidente esta medida por sí sola resultó insuficiente. No se había aplicado ninguna otra medida de seguridad para mejorar la protección contra las inundaciones, por ejemplo para evitar la inundación de los generadores diésel de emergencia.

Además de las revaluaciones hechas con la metodología de la Sociedad de Ingenieros Civiles del Japón, la TEPCO había realizado, antes del accidente, cálculos de pruebas de los niveles de inundación en caso de tsunami. En uno de estos cálculos de pruebas [30] se había aplicado el modelo de fuente propuesto por la Oficina Central de Promoción de la Investigación sobre los Terremotos, que utilizaba la información más reciente y tomaba en consideración escenarios diferentes [30, 33]. Este modelo estudiaba el potencial de la Fosa de Japón, frente a la costa de la prefectura de Fukushima, de provocar un tsunami, en lugar de basarse solo en los registros históricos de tsunamis en esa parte de la zona de subducción tectónica.

El nuevo enfoque, aplicado entre 2007 y 2009, había postulado un terremoto de magnitud 8,3 frente a la costa de Fukushima. Un terremoto de esa magnitud podía causar un tsunami con una subida de alrededor de 15 m en la central nuclear de Fukushima Daiichi (parecida a la altura efectiva del tsunami del 11 de marzo de 2011), que inundaría los edificios principales. Sobre la base de este nuevo análisis, la TEPCO, el OSNI y otras organizaciones del Japón habían considerado que se requerían nuevos estudios e investigaciones. La TEPCO y otras compañías de electricidad habían pedido a la Sociedad de Ingenieros Civiles del Japón que examinara la idoneidad de los modelos de fuentes de tsunami; esta labor estaba en curso en marzo de 2011.

La TEPCO no había adoptado ninguna medida compensatoria provisional en respuesta a las estimaciones más altas de la altura de un tsunami, y el OSNI tampoco había pedido a la TEPCO que actuara con prontitud ante esos resultados [30].

No obstante las dificultades e incertidumbres de la evaluación del peligro sísmico, los sucesos de la central nuclear de Fukushima Daiichi demostraron la robustez de las centrales nucleares japonesas en relación con el movimiento vibratorio de la tierra causado por un terremoto. El 11 de marzo de 2011,

las aceleraciones máximas registradas en la losa de sustentación de los edificios de los reactores de las Unidades 1 a 5 de Fukushima Daiichi fueron considerablemente mayores que las que se habían estimado al diseñar la central. Pese a ello, no hubo indicación alguna de que el movimiento del terreno causara un daño notable a las estructuras, los sistemas o los componentes relacionados con la seguridad [34]. No obstante, las defensas contra las inundaciones debidas a un tsunami resultaron inadecuadas frente a unas olas de tsunami con alturas mucho mayores que las empleadas para el diseño de la central nuclear de Fukushima Daiichi. En ese diseño no se consideró la posibilidad de un escenario de peligros naturales extremos simultáneos que afectaran a unidades múltiples. El suministro oportuno de recursos para la puesta en práctica de medidas de gestión de un accidente severo en la central nuclear de Fukushima Daiichi se vio comprometido por la perturbación fuera del emplazamiento a nivel regional a causa de los extensos daños en la infraestructura provocados por el terremoto y el tsunami.

La experiencia operativa en las centrales nucleares del Japón y de otros lugares en los 12 años anteriores al accidente indicaba la posibilidad de consecuencias muy graves en caso de inundación. La experiencia pertinente a ese respecto incluía: una marejada ciclónica que había causado la inundación de dos reactores en la central nuclear de Le Blayais, en Francia, en 1999; el tsunami del océano Índico de 2004, que había inundado las bombas de agua de mar en la central nuclear de Madras, en la India; y el terremoto de Niigata-Chuetsu-Okai de 2007, en el Japón. Este último terremoto había afectado a la central nuclear de Kashiwazaki-Kariwa de la TEPCO, inundando el edificio del reactor de la Unidad 1 debido al fallo de las tuberías subterráneas externas para la extinción de incendios [35 a 38].

2.2.2. Aplicación del concepto de defensa en profundidad

La defensa en profundidad es un concepto que se aplica para garantizar la seguridad de las instalaciones nucleares desde el comienzo del desarrollo de la energía nucleoelectrónica. Su objetivo es contrarrestar los posibles fallos humanos y del equipo mediante varios niveles de protección. Múltiples medios independientes proporcionan esta defensa en cada nivel de protección.

En el diseño de la central nuclear de Fukushima Daiichi se habían considerado el equipo y los sistemas para los tres primeros niveles de defensa en profundidad: 1) el equipo destinado a asegurar un funcionamiento normal fiable; 2) el equipo destinado a restablecer las condiciones de seguridad en la central después de un suceso anormal; y 3) los sistemas de seguridad destinados a hacer frente a condiciones de accidente. Las bases de diseño se derivaron empleando una serie de peligros postulados; sin embargo, los peligros externos tales como los tsunamis no se habían tenido plenamente en cuenta. En consecuencia, la inundación resultante del tsunami afectó simultáneamente a los tres primeros niveles de protección de la defensa en profundidad, lo que provocó fallos de causa común de los equipos y los sistemas en cada uno de los tres niveles.

Los fallos de causa común de múltiples sistemas de seguridad crearon en la central unas condiciones que no se habían previsto en el diseño. Por consiguiente, los medios de protección destinados a proporcionar el cuarto nivel de la defensa en profundidad, es decir, la prevención de la progresión de los accidentes severos y la mitigación de sus consecuencias, no estuvieron disponibles para restablecer la refrigeración de los reactores ni mantener la integridad de la contención. La pérdida completa de la energía eléctrica, la falta de información sobre los parámetros de seguridad pertinentes debido a la no disponibilidad de los instrumentos necesarios, la pérdida de los dispositivos de control y la insuficiencia de los procedimientos de operación imposibilitaron el despliegue de las disposiciones para detener la progresión del accidente y limitar sus consecuencias.

Al no disponer de suficientes medios de protección en cada nivel de la defensa en profundidad, se produjeron daños severos en los reactores de las Unidades 1, 2 y 3, con emisiones radiactivas importantes desde esas tres unidades.

El terremoto del 11 de marzo de 2011 causó daños importantes a la infraestructura de la región, provocando, entre otras cosas, la pérdida de las conexiones de la central nuclear de Fukushima Daiichi con la red eléctrica exterior. El resultado de ello fue una desviación del funcionamiento normal de la planta (el nivel 1 de la defensa en profundidad). Tras el terremoto, las fuentes del emplazamiento aseguraron el suministro de energía eléctrica, y todos los sistemas de seguridad del nivel 3 de la defensa en profundidad siguieron funcionando conforme al diseño. Esto indicó que los sistemas y el equipo de seguridad habían resistido el peligro sísmico [8].

La central estaba construida cerca del nivel del mar y la protección contra el peligro de inundación no fue suficiente, porque el riesgo de inundación no se había estimado correctamente [27]. El equipo de seguridad fundamental no se encontraba protegido en compartimientos estancos, ni a elevaciones mayores que lo protegieran de una inundación. Ello llevó a la pérdida de las disposiciones para la evacuación del calor residual y la refrigeración de la contención correspondientes a los niveles 1, 2 y 3 de la defensa en profundidad.

La inundación fue la causa común del fallo del sistema de suministro eléctrico de emergencia, la pérdida casi completa de los sistemas de alimentación de corriente continua a los dispositivos de medición y control, y la destrucción de las estructuras y componentes que proporcionaban refrigeración con agua de mar a la central.

Los objetivos del nivel 4 de la defensa en profundidad son prevenir la progresión de los accidentes y mitigar las consecuencias de un accidente severo. Para las medidas del nivel 4, los operadores tuvieron que utilizar todos los medios disponibles para suministrar agua a los reactores y lograr la adecuada evacuación del calor residual. Esto requería la disponibilidad de instrumentos que proporcionaran información fiable sobre los parámetros de seguridad fundamentales, y medios sencillos y fiables para reducir la presión en el reactor. Además, los operadores debían tener orientaciones claras y estar capacitados para poner en marcha las medidas de gestión de accidentes [41].

Con la progresión del accidente, los operadores perdieron la capacidad de medir de manera fiable los parámetros de seguridad importantes desde la sala de control. Esta información era necesaria para determinar el estado del reactor y adoptar decisiones bien fundamentadas sobre medidas y métodos inhabituales para enfriar los reactores. No obstante, los operadores atribuyeron alta prioridad a la refrigeración de los reactores y consiguieron preparar rápidamente líneas de suministro de agua con la intención de inyectar refrigerante en los reactores mediante las bombas de baja presión disponibles. Sin embargo, los intentos de aliviar la presión de los reactores fracasaron, porque no se habían previsto medios para cumplir esta función después de una pérdida total de la energía eléctrica. La electricidad requerida para el control no se pudo restablecer a tiempo para evitar el daño al núcleo [8].

La última barrera física incluida en el nivel 4 de la defensa en profundidad es la contención del reactor. Su propósito es mitigar las consecuencias de los accidentes evitando que se produzcan grandes emisiones radiactivas al medio ambiente desde el reactor dañado. En función del tipo de contención, se necesitan diversos sistemas o clases de equipo para proteger la contención contra los fenómenos físicos asociados con accidentes que dañen el núcleo y que puedan comprometer la integridad de la contención. Las unidades de la central nuclear de Fukushima Daiichi tenían medios para ventear de forma controlada la contención con el fin de aliviar la presión excesiva que pudiera acumularse a causa de una fuga de vapor desde el circuito de refrigeración de los reactores. Además, la atmósfera dentro de la contención estaba llena de nitrógeno inerte para eliminar la combustión del hidrógeno y evitar posibles explosiones.

Recuadro 2.5. El concepto de la defensa en profundidad aplicable en la época del accidente [27]

El concepto de la defensa en profundidad, tal como se aplica a todas las actividades de seguridad, ya sea que se relacionen con la organización, los comportamientos o el diseño, asegura que esas actividades sean objeto de disposiciones que se traslapen, de modo que si se produce un fallo, este se detecte y se compense o corrija con medidas apropiadas. El concepto se ha elaborado más a fondo desde 1988 [39, 40]. La aplicación del concepto de defensa en profundidad a lo largo del diseño y la explotación proporciona una protección graduada contra una amplia variedad de transitorios, incidentes operacionales previstos y accidentes, incluidos los que puedan resultar de un fallo del equipo o una acción humana dentro de la central y de sucesos que se originen fuera de ella.

La aplicación del concepto de defensa en profundidad en el diseño de una central proporciona una serie de niveles de defensa (características inherentes, equipo y procedimientos) que tienen por objeto prevenir los accidentes y asegurar una protección adecuada en caso de que la prevención no funcione.

- 1) La finalidad del primer nivel de defensa es evitar las desviaciones del funcionamiento normal y prevenir los fallos de los sistemas. Para ello se establece el requisito de que la central se diseñe, construya, mantenga y explote de manera correcta y prudente, de conformidad con los niveles de calidad y las prácticas de ingeniería adecuadas, como el cumplimiento de las condiciones de redundancia, independencia y diversidad. Para alcanzar este objetivo se presta una cuidadosa atención a la selección de códigos de diseño y materiales adecuados, y al control de la fabricación de los componentes y la construcción de la planta. Las opciones de diseño que pueden contribuir a reducir el potencial de peligros internos (por ejemplo, el control de la respuesta a un suceso iniciador postulado), a mitigar las consecuencias de un determinado suceso iniciador postulado o a reducir el término fuente probable de emisión después de una secuencia de accidente ayudan a establecer este nivel de defensa. También se presta atención a los procedimientos que intervienen en el diseño, la fabricación y la construcción, y en la inspección, el mantenimiento y los ensayos de la planta en el servicio, a la facilidad de acceso para estas actividades, a la forma en que se explota la central y al uso que se hace de la experiencia operacional. Todo el proceso está respaldado por un análisis detallado en que se determinan los requisitos operacionales y de mantenimiento de la central.
- 2) La finalidad del segundo nivel de defensa es detectar e interceptar las desviaciones de los estados operacionales normales para evitar que los incidentes operacionales previstos se agraven y se transformen en condiciones de accidente. Este nivel tiene en cuenta que, a pesar de las precauciones que se tomen para evitarlos, es probable que en la vida útil de una central nuclear se produzcan algunos de los sucesos iniciadores postulados. Este nivel requiere el establecimiento de los sistemas específicos que se determinen en el análisis de seguridad y la definición de procedimientos operativos para prevenir o reducir al mínimo el daño causado por esos sucesos iniciadores postulados.
- 3) Para el tercer nivel de defensa, se presupone que, aunque ello sea muy improbable, los niveles anteriores no consigan detener el agravamiento de ciertos incidentes operacionales previstos o sucesos iniciadores postulados y se produzca un suceso más grave. Estos sucesos improbables se prevén en la base de diseño de la central, y se utilizan elementos de seguridad inherente, el diseño basado en el fallo sin riesgo y equipos y procedimientos adicionales para controlar sus consecuencias y alcanzar estados estables y aceptables en la central después de esos sucesos. Esto motiva el requisito de que existan elementos de salvaguardia tecnológica que sean capaces de poner a la central primero en un estado controlado, y posteriormente en un estado de parada segura, y de mantener por lo menos una barrera de confinamiento del material radiactivo.
- 4) La finalidad del cuarto nivel de defensa es hacer frente a los accidentes severos en que se sobrepase la base de diseño, y asegurarse de que las emisiones radiactivas sean lo más bajas posible. El objetivo más importante de este nivel es proteger la función de confinamiento. Ello puede lograrse mediante medidas y procedimientos complementarios para prevenir la progresión del accidente, y mediante la mitigación de las consecuencias de determinados accidentes severos, además de los procedimientos de gestión de accidentes. La protección que ofrece el confinamiento puede demostrarse utilizando métodos basados en la estimación más probable.
- 5) El quinto y último nivel de defensa tiene por finalidad mitigar las consecuencias radiológicas de las emisiones de materiales radiactivos que puedan derivarse de las condiciones de accidente. Para ello se requiere un sistema de control de emergencias debidamente equipado (véase la sección 3, relativa a la preparación y respuesta en situaciones de emergencia).

Un aspecto importante de la aplicación de la defensa en profundidad es el establecimiento, en el diseño, de una serie de barreras físicas para confinar el material radiactivo en lugares especificados. El número de barreras físicas necesario dependerá de los peligros externos e internos que existan, y de las posibles consecuencias de los fallos. Las barreras pueden consistir, por ejemplo para los reactores refrigerados por agua, en la matriz del combustible, las vainas del combustible, la barrera de presión del sistema de refrigeración del reactor y la contención.

Las mediciones hechas durante el accidente indican que las presiones de la contención de las Unidades 1, 2 y 3 aumentaron en algunos momentos a niveles cercanos o superiores a aquellos para los que se habían diseñado las contenciones respectivas. Este aumento de la presión se debió a la pérdida de los sistemas de refrigeración de la contención y a la generación de vapor por los núcleos sobrecalentados de los reactores. Aunque algunos sistemas de venteo de la contención se pudieron abrir, hay indicaciones de que las contenciones de las Unidades 1, 2 y 3 fallaron, causando la emisión de material radiactivo y de hidrógeno. La atmósfera de nitrógeno de las contenciones evitó efectivamente la combustión y explosión del hidrógeno en ese espacio confinado. Sin embargo, con el escape del hidrógeno de las contenciones a los edificios de los reactores, se produjeron explosiones en las Unidades 1, 3 y 4 [8].

El accidente de Fukushima Daiichi demostró que los peligros naturales extremos pueden inutilizar o menoscabar múltiples niveles de la defensa en profundidad [42, 43]. Por lo tanto, deben incluirse una determinación y evaluación sistemática de los peligros externos y una protección robusta contra esos peligros en todos los niveles de la defensa en profundidad. Además, el accidente demostró que las disposiciones de diseño alternativas y los medios de gestión de accidentes podían asegurar el suministro de agua de refrigeración al reactor incluso si se perdían todos los principales sistemas de seguridad diseñados para proteger al reactor contra accidentes. Sin embargo, para el uso oportuno de esas disposiciones se requieren instrumentos que faciliten información fiable sobre los parámetros de seguridad fundamentales, y mecanismos sencillos y fiables para aliviar la presión del reactor, a fin de poder utilizar los medios disponibles para el suministro de agua de refrigeración al reactor.

2.2.3. Evaluación de la incapacidad de cumplir las funciones de seguridad fundamentales

Las tres funciones de seguridad fundamentales para mantener la seguridad son: el control de la reactividad en el combustible nuclear; la evacuación del calor del núcleo del reactor y de la piscina de combustible gastado; y el confinamiento del material radiactivo. Después del terremoto, la primera función de seguridad fundamental —el control de la reactividad— se cumplió en las seis unidades de la central nuclear de Fukushima Daiichi.

La segunda función de seguridad fundamental —la evacuación del calor del núcleo del reactor y de la piscina de combustible gastado— no se pudo mantener porque los operadores estuvieron privados de casi todos los medios de control de los reactores de las Unidades 1, 2 y 3, así como de las piscinas de combustible gastado, como resultado de la pérdida de la mayoría de los sistemas eléctricos de corriente alterna y continua. La pérdida de la segunda función de seguridad fundamental se debió, en parte, a la imposibilidad de realizar una inyección de agua por otros medios a causa de los retrasos en la despresurización de las vasijas de presión de los reactores. La pérdida de la refrigeración condujo al sobrecalentamiento y la fusión del combustible en los reactores.

La función de confinamiento se perdió como consecuencia del corte de la alimentación de corriente alterna y continua, que inutilizó los sistemas de refrigeración y dificultó el empleo por los operadores del sistema de venteo de la contención. El venteo era necesario para aliviar la presión e impedir el fallo de la contención. Los operadores lograron ventear las Unidades 1 y 3 para reducir la presión en las vasijas de contención primaria, pero esto supuso la generación de emisiones radiactivas al medio ambiente. Aunque se abrieron las válvulas de venteo de la contención para las Unidades 1 y 3, las vasijas de contención primaria de esas unidades acabaron fallando. En el caso de la Unidad 2 no se logró ventear la contención y esta falló, lo que causó emisiones radiactivas.

Recuadro 2.6. Funciones de seguridad fundamentales

Las tres funciones de seguridad fundamentales son:

- 1) el control de la reactividad;
- 2) la evacuación del calor;
- 3) el confinamiento del material radiactivo.

Antes del accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi, hubo dos accidentes en que no se logró mantener una o más de las funciones de seguridad fundamentales. El accidente de 1979 en la central nuclear de Three Mile Island, en los Estados Unidos de América, se produjo debido a la pérdida de la segunda de estas funciones de seguridad, pero la tercera función, el confinamiento del material radiactivo en la vasija de contención, consiguió evitar las emisiones radiactivas al medio ambiente. El accidente de 1986 en la central nuclear de Chernóbil de la ex Unión Soviética fue consecuencia de la pérdida de la primera de estas funciones de seguridad. Esta central no tenía vasija de contención. Por consiguiente, el accidente de Chernóbil produjo una emisión radiactiva muy grande al medio ambiente. El accidente de Fukushima Daiichi se debió a la pérdida de la segunda y la tercera de estas funciones de seguridad, tras una combinación de sucesos externos extremos.

Control de la reactividad del combustible nuclear en el núcleo del reactor

Los sistemas de seguridad para controlar la reactividad del combustible nuclear en el núcleo del reactor son los sistemas de protección del reactor y de accionamiento de las barras de control. Cuando se produjo el terremoto, las Unidades 1 a 3 de Fukushima Daiichi estaban en funcionamiento; las Unidades 4 a 6 estaban paradas para el mantenimiento. Los reactores de las Unidades 1 a 3 pararon automáticamente por acción de los sistemas de protección de los reactores, que fueron activados por el equipo de monitorización sísmica. La inserción de las barras de control de los reactores por los sistemas de accionamiento de esas barras interrumpió la reacción nuclear en cadena en el combustible nuclear y puso los reactores en estado de parada.

Evacuación del calor del combustible nuclear

Tras la parada de las Unidades 1 a 3, el calor residual, producido por el decaimiento constante de las sustancias radiactivas del combustible, se evacuó con los sistemas de refrigeración de los reactores. Esto mantuvo la segunda función de seguridad fundamental. Los sistemas de refrigeración comprendían lazos de circulación cerrados para transferir calor al agua de mar, y diversos medios para inyectar agua a baja y alta presión en los núcleos de los reactores a fin de eliminar ese calor residual (véase la sección 2.1).

Muchos de estos sistemas necesitaban corriente alterna para funcionar, y todos ellos requerían corriente continua para el control de su funcionamiento. En el curso del accidente se perdieron la mayoría de las fuentes de energía eléctrica; en esta parte del informe se examina el efecto de esa pérdida del suministro eléctrico.

Unidad 1

El condensador de aislamiento (véase el recuadro 2.2) para la refrigeración de la Unidad 1 se puso en marcha automáticamente en respuesta a una señal de alta presión en la vasija del reactor. Cuando el reactor paró a causa del terremoto, se abrieron las válvulas de aislamiento en las líneas de retorno del condensado (las otras válvulas de aislamiento de las tuberías estaban abiertas durante el funcionamiento normal). Conforme a lo establecido en los procedimientos operativos, los operadores detuvieron y volvieron a poner en marcha el sistema del condensador de aislamiento varias veces para impedir que el reactor se enfriara con demasiada rapidez y causara una tensión térmica que excediera de los valores de diseño de la vasija de presión del reactor. Esto se efectuó abriendo y cerrando las válvulas de aislamiento de las líneas de retorno del condensado [8].

Cuando el tsunami inundó el emplazamiento y se perdió la energía eléctrica, los operadores acababan de detener el sistema del condensador de aislamiento cerrando una válvula de la línea de retorno fuera de la vasija de contención primaria. Los operadores no disponían de información sobre las posiciones de las válvulas del condensador de aislamiento, y solo unas tres horas más tarde comenzaron los intentos de reactivar manualmente ese condensador. Los operadores no estaban plenamente capacitados para entender el funcionamiento de las válvulas en esas condiciones. Finalmente hicieron dos intentos infructuosos de poner nuevamente en marcha el condensador de aislamiento desde la sala de control principal abriendo las válvulas de aislamiento exteriores. Los operadores no contaban con procedimientos para accionar manualmente el condensador de aislamiento. Cuando se redactó el presente informe, se desconocía la posición exacta de todas las válvulas del sistema del condensador de aislamiento, pero según las indicaciones, ese condensador dejó de funcionar después del tsunami [8].

El sistema de inyección de refrigerante a alta presión accionado por una turbina de vapor tampoco funcionó, debido a la pérdida de la alimentación de corriente continua.

Al haberse perdido el condensador de aislamiento y el sistema de inyección de refrigerante a alta presión, se necesitaba un medio alternativo de inyección de agua en la vasija de presión del reactor que utilizara equipo de baja presión, como las bombas de extinción de incendios o los camiones de bomberos. Los operadores prepararon las vías de inyección en tiempo oportuno, pero para poder inyectar agua a baja presión era preciso también reducir la presión dentro de la vasija de presión del reactor utilizando las válvulas de alivio y seguridad. Estas válvulas no se pudieron abrir debido a la pérdida de la alimentación eléctrica de los sistemas de control y a la falta de aire a alta presión. La presión en la vasija del reactor y en la contención era demasiado alta como para poder inyectar suficiente agua para enfriar el combustible sin ventear la contención y despresurizar la vasija de presión del reactor. Así pues, los sistemas alternativos de inyección de agua a baja presión no fueron capaces de inyectar agua en la vasija de presión del reactor.

La presión en la vasija del reactor se mantuvo alta hasta que el núcleo hubo sufrido un daño severo. La causa más probable del alivio de la presión fue la fractura de la vasija de presión del reactor debido a la fusión [44]. La suposición de que el alivio de la presión se debió a una fractura está respaldada por el aumento de la presión en la contención pocas horas después de recibirse las indicaciones de un daño severo en el núcleo. La consiguiente reducción de la presión hizo que las condiciones fueran favorables para la primera inyección de agua en la vasija de presión del reactor alrededor de 12 horas después del tsunami. Pero para entonces el combustible ya había sufrido un daño importante [8].

Se estima que el daño al núcleo del reactor se produjo entre 4 y 5 horas después del tsunami, y que el núcleo fundido fracturó la base de la vasija del reactor entre 6 y 8 horas después del tsunami. Los primeros signos de emisión radiactiva al medio ambiente se observaron alrededor de 12 horas después del tsunami, y cuando se ventearon la contención de la Unidad 1 para evitar la fractura debido a la alta presión, aproximadamente 23 horas después del tsunami, se produjo una emisión grande. Las reacciones químicas entre las vainas del combustible y el agua habían generado grandes cantidades de hidrógeno, que pasaron de la vasija de presión del reactor a la vasija de contención primaria y luego escaparon al edificio del reactor [8].

Unidad 2

La Unidad 2 tenía un diseño diferente para evacuar el calor residual del núcleo del reactor. El sistema de refrigeración del núcleo del reactor aislado (véase el recuadro 2.2) utilizaba vapor de la vasija de presión del reactor para impulsar una turbina que bombeaba agua a la vasija del reactor. El sistema de refrigeración del núcleo del reactor aislado de la Unidad 2 fue puesto en marcha manualmente después de la pérdida del suministro eléctrico exterior. Para accionar este sistema a distancia se necesitaba corriente continua, y el sistema estaba diseñado para que funcionara por lo menos durante cuatro horas. Sin embargo, el sistema siguió funcionando en esas difíciles condiciones durante aproximadamente 68 horas, sin corriente continua y sin intervenciones de los operadores [8]. El sistema consiguió mantener el nivel de agua en la vasija de presión del reactor por encima del combustible y cumplió la función de refrigeración.

También hay indicaciones de que, después de unas 68 horas, el sistema de refrigeración del núcleo del reactor aislado dejó de funcionar, y no fue posible seguir inyectando agua en la vasija de presión del reactor, porque se encontraba a alta presión. Se estimó que el nivel de agua en la vasija de presión del reactor bajaría hasta el borde superior del núcleo en pocas horas después de la parada del sistema de refrigeración del núcleo del reactor aislado. Los operadores recurrieron a otro equipo, similar al empleado en la Unidad 1, para inyectar agua a baja presión. Después de algunas dificultades iniciales, lograron reducir la presión en la vasija de presión del reactor empleando las válvulas de alivio y seguridad, pero la inyección llegó demasiado tarde para evitar el rápido calentamiento del combustible y el daño al núcleo del reactor.

El sistema de venteo de la contención no logró aliviar la presión en la Unidad 2. Se supone que este fallo se dio porque el disco de ruptura no se fracturó. Se estima que el núcleo del reactor de la Unidad 2 comenzó a fusionarse alrededor de 76 horas después del tsunami. Las emisiones radiactivas empezaron unas 89 horas después del tsunami, tras el fallo de la barrera de contención, como quedó de manifiesto por la rápida caída de la presión de la contención [45].

Unidad 3

En la Unidad 3 se contó con corriente continua durante dos días aproximadamente, en contraste con la situación en las Unidades 1 y 2. Esto significó que se pudieron utilizar los sistemas de refrigeración del núcleo del reactor aislado y de inyección de refrigerante a alta presión mediante las turbobombas. En un principio, los operadores lograron mantener los niveles de agua en el núcleo del reactor inyectando agua con el sistema de refrigeración del núcleo del reactor aislado. Los operadores aplicaron procedimientos que les permitieron maximizar la duración de las baterías para ese sistema de refrigeración del núcleo [8].

Además, la liberación de vapor de la vasija de presión del reactor a la cámara de supresión funcionó, y la presión de la cámara de supresión pudo controlarse rociando agua con bombas de incendios. Esta situación duró 20 horas, hasta que el sistema de refrigeración del núcleo del reactor aislado dejó de funcionar y no fue posible ponerlo nuevamente en marcha. El sistema de inyección de refrigerante a alta presión comenzó automáticamente a inyectar agua en la vasija de presión del reactor para mantener el nivel de agua.

El sistema de inyección de refrigerante a alta presión está previsto para rellenar rápidamente la vasija de presión del reactor en caso de fuga en el sistema de refrigeración del reactor. Este sistema fue muy eficaz para reducir la presión en la vasija de presión del reactor. Sin embargo, también provocó una caída de la presión de entrada del vapor en la turbina de la bomba por debajo de las especificaciones de la bomba, y la eficiencia de esta disminuyó considerablemente. Al cabo de unas 14 horas, los operadores decidieron apagar el sistema, por temor a que fallara y comenzara a producirse un escape de material radiactivo de la contención.

Tras la parada del sistema de inyección de refrigerante a alta presión, los operadores prepararon una línea de inyección a la vasija del reactor y se predispusieron a inyectar agua de mar. Pero, debido a la elevada presión del reactor, no era posible inyectar agua de mar mientras este no se hubiera despresurizado. A causa de este retraso en la inyección de agua de mar en la vasija del reactor, el nivel de agua siguió bajando hasta llegar cerca del borde superior del combustible. Se ha determinado que una señal automática, probablemente falsa, desencadenó la despresurización automática rápida mediante las válvulas de alivio y seguridad, antes de que los operadores pudieran abrir las válvulas de seguridad de manera más controlada [46]. Se estima que la despresurización, junto con el bajo nivel de agua en la vasija de presión, causó la evaporación casi instantánea del agua restante en el núcleo del reactor, provocando la pérdida de la refrigeración adecuada del núcleo. La serie de sucesos posteriores, que condujeron a la pérdida de la refrigeración del núcleo del reactor, fue similar a la ocurrida en la Unidad 2.

El núcleo comenzó a sobrecalentarse, y la importante descarga de vapor de la vasija de presión del reactor a la cámara de supresión de la contención elevó la presión a un nivel que causó la fractura del disco de ruptura de la línea de venteo, abriendo una vía de emisión al medio ambiente [8]. Se estima que la fusión del núcleo del reactor de la Unidad 3 comenzó alrededor de 43 horas después del tsunami. Las emisiones radiactivas grandes empezaron aproximadamente 47 horas después del tsunami [8].

Unidad 4

La Unidad 4 estaba parada para una inspección programada cuando se produjo el accidente. En ese momento, todo el combustible de la Unidad 4 se encontraba en la piscina de combustible gastado. Por lo tanto, no fue necesario refrigerar el núcleo del reactor de esa unidad. En la piscina de combustible gastado, la refrigeración no fue posible debido a la pérdida del suministro eléctrico, y la temperatura comenzó a aumentar.

Piscinas de combustible gastado

En los primeros días después del tsunami, los operadores consideraron que había suficiente agua en las piscinas de combustible gastado, y que el sobrecalentamiento del combustible no era un motivo de preocupación inmediata. Esta opinión cambió el 15 de marzo, cuando explotó el edificio del reactor de la Unidad 4. En ese momento se pensó que la causa de la explosión había sido el hidrógeno, y que la única fuente posible de hidrógeno en la Unidad 4 era el combustible de la piscina de combustible gastado sobrecalentado debido a la pérdida de la cubierta de agua. Esto suscitó la preocupación inmediata de saber cuánta agua quedaba en esa piscina, y se realizaron esfuerzos por determinar el nivel de agua de las piscinas de combustible gastado.

El 16 de marzo, las inspecciones visuales indicaron que aún quedaba agua en la piscina de la Unidad 4. No obstante, la situación en la Unidad 3 era inquietante, ante lo cual se emprendieron diversas medidas de mitigación, que incluyeron el lanzamiento de agua desde el aire, con helicópteros. Análisis e inspecciones posteriores revelaron que el nivel de agua de las piscinas de combustible gastado de las Unidades 3 y 4 no había bajado hasta el nivel del combustible gastado. Estas inspecciones confirmaron que la explosión en la Unidad 4 había sido causada por hidrógeno, y que el hidrógeno no se había generado a partir del combustible de la piscina de combustible gastado de la Unidad 4, sino que había migrado de la Unidad 3 a la 4 a través de un sistema de ventilación común. Sin embargo, ante el desconocimiento de las condiciones efectivas reinantes en las piscinas de combustible gastado durante el accidente, debido a la pérdida de la instrumentación, se hicieron esfuerzos por añadir agua a las piscinas. En la sección 2.1 se describen en detalle los hechos relacionados con las piscinas de combustible gastado.

Unidades 5 y 6

Las Unidades 5 y 6 también se vieron afectadas por el tsunami, pero sus reactores estaban generando menos calor residual porque habían estado parados por un período de tiempo considerable antes del accidente. Además, uno de los generadores diésel de emergencia de la Unidad 6 sobrevivió a la inundación y estaba en condiciones de funcionar. Por consiguiente, los operadores tuvieron más tiempo para responder a la situación, e hicieron funcionar los sistemas de refrigeración de ambas unidades con el generador diésel de emergencia restante. Este suministro de energía eléctrica mantuvo la refrigeración de los núcleos de los reactores y se utilizó también para refrigerar las piscinas de combustible gastado en las Unidades 5 y 6, que pudieron enfriarse hasta alcanzar una condición segura [8].

Confinamiento del material radiactivo y control de las emisiones radiactivas

El daño sufrido por los núcleos de los reactores de las Unidades 1 a 3 dio lugar al escape de grandes cantidades de vapor e hidrógeno de las vasijas de presión de los reactores. Ello a su vez presurizó y

calentó las vasijas de contención primaria. Estas vasijas se fracturaron y causaron la emisión de vapor, hidrógeno y otros gases, junto con material radiactivo, a los edificios de los reactores y posteriormente al medio ambiente.

Las vasijas de contención primaria de los reactores no se habían diseñado para resistir la presión que podía generarse en un accidente severo; por ese motivo, en los años noventa se habían instalado sistemas de venteo [22, 23] para limitar la presión en ellas en caso de accidente. Según los indicios, las vasijas de contención primaria de las Unidades 1 a 3 fallaron en diversas fases de la progresión del accidente. Esto se debió a los niveles de presión y temperatura alcanzados en ellas, que excedieron con mucho de la capacidad prevista en el diseño antes de que se pudiera proceder al venteo (véase la sección 2.1). La fuga de material radiactivo de los núcleos de los reactores fue mitigada parcialmente por las piscinas de supresión, que retuvieron algunos de los radionucleidos emitidos de las vasijas de presión de los reactores.

2.2.4. Evaluación de los accidentes que sobrepasan la base de diseño y gestión de los accidentes

Los análisis de seguridad realizados durante el proceso de concesión de la licencia para la central nuclear de Fukushima Daiichi y durante su funcionamiento no abordaron plenamente la posibilidad de que se produjera una secuencia compleja de sucesos que pudiera conducir a un daño severo del núcleo del reactor. En particular, los análisis de seguridad no determinaron la vulnerabilidad de la central a las inundaciones, ni los puntos débiles de los procedimientos operativos y las directrices para la gestión de accidentes. Las evaluaciones probabilistas de la seguridad no incluyeron la posibilidad de una inundación interna, y los supuestos relativos a la actuación humana para la gestión de los accidentes eran optimistas. Además, los requisitos impuestos por el órgano regulador para que las entidades explotadoras tuvieran en cuenta la posibilidad de que se produjeran accidentes severos eran limitados.

Los operadores no estaban plenamente preparados para la pérdida del suministro eléctrico en múltiples unidades y la pérdida de la refrigeración causada por el tsunami. Aunque la TEPCO había elaborado directrices para la gestión de accidentes severos, estas directrices no abarcaban esta combinación improbable de sucesos. Así pues, los operadores no habían recibido la capacitación adecuada, ni habían participado en ejercicios pertinentes de simulación de accidentes severos, y el equipo de que disponían no era apropiado en las condiciones degradadas de la central.

En septiembre de 2012 se estableció la Autoridad de Reglamentación Nuclear (ARN). La ARN formuló nueva reglamentación para las centrales nucleares con el fin de proteger a las personas y el medio ambiente. Esa reglamentación, que entró en vigor en 2013, reforzó las contramedidas para prevenir la pérdida simultánea de todas las funciones de seguridad debido a una causa común, incluida la revaluación de los efectos de sucesos externos tales como terremotos y tsunamis. También se introdujeron contramedidas nuevas en la respuesta a accidentes severos para evitar daños al núcleo y a la vasija de contención y la difusión de material radiactivo.

Las normas de seguridad del OIEA vigentes en la época del accidente exigían que se realizara una evaluación para determinar si se podían cumplir las funciones de seguridad en todos los modos de funcionamiento normales, en condiciones de accidente y en los accidentes que sobrepasaran la base de diseño, incluidos los accidentes severos. Las secuencias de sucesos importantes que podrían culminar en un accidente severo deben determinarse utilizando una combinación de métodos probabilistas y deterministas y una sólida evaluación tecnológica [27]. Además, deben realizarse análisis deterministas específicos de los accidentes que sobrepasan la base de diseño a fin de investigar los escenarios de accidentes creíbles que pueden emplearse para introducir mejoras en las medidas de gestión de accidentes [41]. Por lo tanto, es necesario determinar si es posible cumplir las funciones de seguridad en las condiciones de un accidente que sobrepase la base de diseño.

Recuadro 2.7. Evaluaciones deterministas y probabilistas de la seguridad [47, 48]

Los análisis de seguridad son evaluaciones analíticas de fenómenos físicos que se producen en las centrales nucleares. Los análisis deterministas de seguridad para una central nuclear predicen la respuesta a sucesos iniciadores postulados. Se aplica un conjunto específico de normas y de criterios de aceptación. Normalmente, estos se centran en aspectos neutrónicos, termohidráulicos, radiológicos, termomecánicos y estructurales, que se suelen analizar con distintos instrumentos computacionales.

Conviene realizar análisis deterministas de seguridad basados en las estimaciones más probables a fin de confirmar las estrategias elaboradas para restablecer las condiciones operacionales normales en una central después de transitorios debidos a incidentes operacionales previstos y a accidentes base de diseño. Estas estrategias se recogen en los procedimientos de operación de emergencia, que definen las medidas que deberían adoptarse cuando se producen esos sucesos. Los análisis deterministas de seguridad proporcionan la información necesaria para especificar las medidas que los operadores deben adoptar en respuesta a algunos accidentes, y deberían ser un elemento importante del examen de las estrategias de gestión de accidentes. Al elaborar las estrategias de recuperación, y con el fin de establecer el tiempo que precisa el operador para adoptar las medidas oportunas, conviene realizar cálculos de sensibilidad sobre los momentos en que el operador debe aplicar cada medida, cálculos que pueden utilizarse para optimizar los procedimientos.

También conviene realizar análisis deterministas de seguridad para ayudar a elaborar la estrategia que debe seguir un operador si los procedimientos de operación de emergencia no logran impedir un accidente severo. Los análisis deben utilizarse para determinar los desafíos que cabe prever durante la progresión de accidentes y los fenómenos que se producirán. También deben emplearse para sentar la base que permita elaborar un conjunto de directrices de gestión de accidentes y mitigación de sus consecuencias.

Si bien los análisis deterministas se pueden utilizar para verificar el cumplimiento de los criterios de aceptación, es posible servirse de los análisis probabilistas de seguridad (APS) para determinar la probabilidad de que cada barrera resulte dañada. Así pues, los APS pueden ser un instrumento adecuado para evaluar el riesgo derivado de secuencias de baja frecuencia que dan lugar al daño de barreras, mientras que el análisis determinista es adecuado para sucesos de mayor frecuencia.

Los análisis deterministas de seguridad desempeñan un papel importante en la realización de un APS porque proporcionan información sobre si el escenario del accidente se traducirá en el fallo de una barrera de los productos de fisión. El árbol de fallos de un APS es un poderoso instrumento que se puede utilizar para confirmar supuestos comúnmente utilizados en el cálculo determinista acerca de la disponibilidad de los sistemas.

Los objetivos del APS son determinar todos los factores importantes que contribuyen a los riesgos radiológicos asociados con una instalación o actividad, y evaluar en qué medida el diseño global es equilibrado y cumple los criterios de seguridad probabilistas, cuando estos se han definido. En lo que respecta a la seguridad del reactor, el APS emplea un enfoque amplio y estructurado para identificar escenarios de fallo. Este es un instrumento conceptual y matemático que permite obtener estimaciones numéricas del riesgo. El enfoque probabilista utiliza supuestos realistas siempre que sea posible, y ofrece un marco para abordar explícitamente muchas de las incertidumbres. Los enfoques probabilistas pueden proporcionar información que a veces no es posible obtener con un análisis determinista sobre la fiabilidad del comportamiento de los sistemas, las interacciones y las deficiencias del diseño, la aplicación de la defensa en profundidad y los riesgos.

Las mejoras del enfoque global del análisis de la seguridad han permitido una mayor integración de los métodos deterministas y probabilistas. Con el aumento de la calidad de los modelos y los datos, es posible elaborar análisis deterministas más realistas y utilizar información probabilista al seleccionar los escenarios de accidentes. Se está atribuyendo una importancia creciente a especificar de modo probabilista cómo se ha de demostrar el cumplimiento de los criterios deterministas de seguridad, por ejemplo, estableciendo intervalos de confianza e indicando la forma en que se deben especificar los márgenes de seguridad.

Se pueden utilizar varias técnicas para realizar un APS. El método habitual consiste en emplear una combinación de árboles de sucesos y árboles de fallos. En este análisis, el tamaño relativo (la complejidad) de los árboles de sucesos y de fallos es, en gran medida, una cuestión de preferencias, pero también depende de las características del programa informático que se utilice.

Recuadro 2.7. Evaluaciones deterministas y probabilistas de la seguridad [47, 48] (cont.)

Los árboles de sucesos indican las características generales de las secuencias de accidente, que parten del suceso iniciador y, en función de que los sistemas de seguridad de mitigación y los sistemas relacionados con la seguridad funcionen correctamente o no, conducen a un resultado positivo o a un daño al núcleo, o a uno de los estados de daño de la planta (exigido en el nivel 2 del APS). Los árboles de fallos se utilizan para modelar el fallo de los sistemas de seguridad y los sistemas de apoyo en el cumplimiento de sus funciones de seguridad.

Los árboles de fallos deberían elaborarse a fin de proporcionar un modelo lógico para los estados de fallo de los sistemas de seguridad especificados en el análisis del árbol de sucesos. El criterio de fallo que crea el suceso no deseado del árbol de fallos para cada función del sistema de seguridad debería ser el inverso lógico del criterio de éxito de la secuencia de accidentes. Los sucesos básicos modelados en los árboles de fallos deberían ser coherentes con los datos disponibles sobre los fallos de los componentes. Los modelos de árboles de fallos deberían elaborarse hasta el nivel de los modos de fallo importantes de los distintos componentes (bombas, válvulas, generadores diésel, etc.) y de los distintos errores humanos, y deberían incluir todos los sucesos básicos que puedan conducir, directamente o en combinación con otros sucesos básicos, al suceso no deseado del árbol de fallos.

La TEPCO comenzó a realizar evaluaciones probabilistas de seguridad, junto con algunos análisis deterministas de seguridad en las secuencias de accidente más importantes, en los primeros años noventa. En consonancia con la práctica en los Estados Miembros del OIEA en esa época, estas evaluaciones probabilistas de seguridad se limitaron a los sucesos en centrales nucleares con una sola unidad. Aunque la central nuclear de Fukushima Daiichi estaba situada en una zona en que era posible un tsunami, estos análisis no incluyeron los fallos de causa común provocados por una inundación o por una pérdida amplia de la energía eléctrica [8]. Los estudios probabilistas de evaluación de la seguridad realizados para la central nuclear de Fukushima Daiichi tampoco tuvieron en cuenta las inundaciones o los incendios internos, y los supuestos relativos a las intervenciones de los operadores fueron optimistas.

Se requiere una evaluación probabilista completa de la seguridad, que incluya secuencias de inundaciones internas, para poner de relieve la vulnerabilidad a las inundaciones de los sistemas de importancia vital para la central, como los generadores diésel de emergencia y el aparellaje eléctrico. En 1991, una tubería corroída provocó una fuga de agua a razón de 20 metros cúbicos por hora, que penetró en la sala del sistema de suministro eléctrico de emergencia del reactor por la puerta y por las entradas de los cables en la Unidad 1 de la central nuclear de Fukushima Daiichi. Este suceso demostró la vulnerabilidad a las inundaciones si los generadores diésel de emergencia y el aparellaje eléctrico se encontraban en el sótano.

La orientación para la gestión de accidentes se había evaluado en la central nuclear de Fukushima Daiichi también mediante algunos estudios probabilistas de seguridad de alcance limitado. Por ejemplo, estas evaluaciones habían incluido el uso del sistema de venteo de la contención mediante la aplicación del método del árbol de fallos para simular fallos del equipo con una probabilidad de error humano en la operación manual. Pero no se había efectuado una evaluación a fondo de los problemas con que se podía tropezar en la gestión de un accidente severo, incluida la limitada capacitación y orientación impartida al personal de la central. No se había reconocido que los supuestos acerca de las probabilidades de fallos eran excesivamente optimistas, y los estudios no se tradujeron en mejoras de los procedimientos y la orientación [47] (véase el recuadro 2.8 sobre la gestión de accidentes).

La central nuclear de Fukushima Daiichi tenía algunas deficiencias que no se podían evaluar plenamente con un estudio probabilista de seguridad, como se recomendaba en las normas de seguridad del OIEA [47, 49]. Como ejemplos de ello cabe citar la falta de protección para los generadores diésel de emergencia, las salas de baterías y el aparellaje eléctrico contra una inundación, y la baja probabilidad de éxito de las intervenciones en caso de accidente severo, dado el limitado nivel de orientación, capacitación y conocimiento del personal de la planta sobre la gestión de accidentes severos. Los accidentes que sobrepasan la base de diseño no se habían tenido suficientemente en cuenta, lo que afectó a la capacidad de mantener la refrigeración del núcleo de los reactores, a la posibilidad de los operadores de monitorizar parámetros de seguridad importantes y a la gestión de las condiciones de accidente severo (véase la figura 2.7).

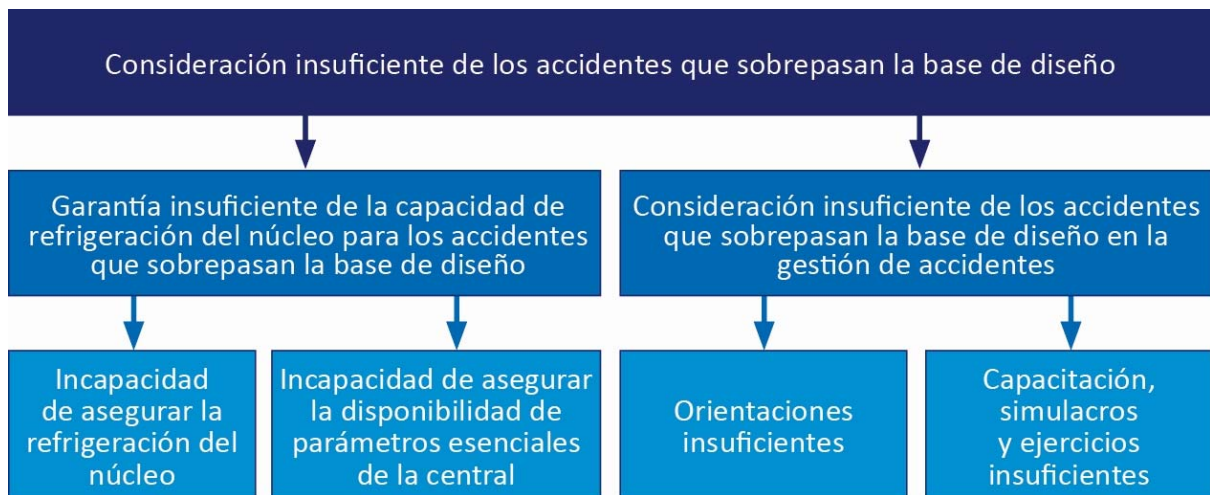


Fig. 2.7. Repercusiones de la consideración insuficiente de los accidentes que sobrepasan la base de diseño en la capacidad de mantener la refrigeración del núcleo del reactor, la posibilidad de los operadores de monitorizar parámetros de seguridad importantes y la gestión de las condiciones de accidente severo [27, 50].

Recuadro 2.8. Gestión de accidentes [41]

Todas las centrales deberían contar con un programa de gestión de accidentes, independientemente de la frecuencia del daño total al núcleo o la frecuencia de la emisión de productos de fisión calculadas para la planta. Al elaborar la orientación para la gestión de accidentes debería utilizarse un enfoque descendente estructurado. Este enfoque debe comenzar con los objetivos y estrategias y culminar con procedimientos y directrices, y abarcar tanto los aspectos de prevención como los de mitigación.

En el nivel superior, los objetivos de la gestión de accidentes se definen como sigue: prevenir un daño importante al núcleo; detener el avance del daño al núcleo si ha comenzado; mantener la integridad de la contención por la mayor cantidad de tiempo posible; reducir al mínimo las emisiones de materiales radiactivos; alcanzar un estado estable a largo plazo. Para lograr estos objetivos, deberían elaborarse varias estrategias.

A partir de esas estrategias, deben derivarse medidas adecuadas y eficaces para la gestión de los accidentes. Esas medidas comprenden modificaciones de la central, cuando se consideren importantes para gestionar accidentes que sobrepasen la base de diseño y accidentes severos, y acciones del personal. Una de ellas es la reparación del equipo que haya fallado. Debe elaborarse una orientación adecuada, en forma de procedimientos y directrices, para el personal encargado de ejecutar las medidas de gestión de accidentes.

Al formular la orientación para la gestión de accidentes, deberían tenerse en cuenta todas las capacidades de la planta previstas en el diseño, utilizando los sistemas de seguridad y no relacionados con la seguridad, e incluyendo el posible uso de algunos sistemas más allá de la función para la que fueron concebidos y de las condiciones de funcionamiento previstas, y sobrepasando posiblemente su base de diseño. Debería especificarse en qué momento ha de producirse la transferencia de la responsabilidad y la autoridad del dominio de la prevención al de la mitigación, sobre la base de criterios debidamente definidos y documentados.

Antes de efectuar cualquier cambio en la configuración de la central, o si aparecen nuevos resultados de investigaciones de fenómenos físicos, deberían estudiarse las repercusiones en la orientación para la gestión de accidentes, e introducirse en esta las modificaciones que sean necesarias.

El limitado alcance de las prescripciones del órgano regulador para los accidentes que sobrepasan la base de diseño contribuyó a que los operadores de la central no consideraran adecuadamente los riesgos pertinentes. Este aspecto se puso de relieve durante una misión del Servicio Integrado de Examen de la Situación Reglamentaria (IRRS) del OIEA realizada en junio de 2007, en que se concluyó que “no existe ninguna norma jurídica que obligue a tener en cuenta los accidentes que sobrepasan la base de diseño, porque se considera que en las centrales japonesas la seguridad está garantizada adecuadamente por las medidas preventivas” [51]. Por ejemplo, el proceso de examen periódico de la seguridad del Japón no exigía a las organizaciones explotadoras que actualizaran sus análisis empleando las técnicas más modernas [52].

En el programa de gestión de accidentes de la TEPCO se supuso que la corriente alterna se recuperaría rápidamente en la central nuclear de Fukushima Daiichi. La TEPCO también supuso que otros servicios esenciales, como la corriente continua y el aire a alta presión, estarían disponibles en todo momento para la alimentación eléctrica de la instrumentación y el funcionamiento de las válvulas. El programa y las directrices no incluían la posibilidad de que un accidente severo afectara a varias unidades de reactores simultáneamente, ni la posibilidad de que se experimentaran dificultades para recibir apoyo desde fuera del emplazamiento debido a la perturbación grave de la infraestructura exterior. Este enfoque era conforme a la práctica internacional de ese entonces. El accidente demostró que el funcionamiento de ciertos sistemas en condiciones que sobrepasen la base de diseño requería una excepcional competencia por parte de los operadores para mantener las funciones de seguridad fundamentales.

La orientación para la gestión de accidentes existente en la central nuclear de Fukushima Daiichi consistía en un conjunto de documentos para los operadores, que incluían procedimientos de operación de emergencia y directrices para la gestión de accidentes severos. Había también directrices para la gestión de accidentes que el personal de apoyo técnico de la TEPCO podía utilizar para organizar la respuesta de emergencia. Colectivamente, esos documentos abarcaban las distintas respuestas a los accidentes base de diseño y los accidentes fuera de la base de diseño, incluidos los accidentes severos. La pérdida de la energía eléctrica y la falta de información adecuada sobre el estado de la central dificultaron la respuesta eficaz de los operadores a los sucesos que se iban produciendo. Las directrices para la gestión de accidentes no abarcaban medidas de contingencia en caso de pérdida de la instrumentación necesaria para obtener los parámetros esenciales que permitieran a los operadores determinar el estado de la central nuclear. Además, las directrices no daban recomendaciones para gestionar accidentes cuando todos los sistemas de distribución eléctrica relacionados con la seguridad, y posteriormente muchos de los sistemas de seguridad que dependieran de ellos, dejaran de funcionar.

El personal no estaba capacitado para adoptar medidas de gestión de accidentes en caso de apagón prolongado de la central, o cuando la información fuera limitada o nula. A pesar de ello, el personal de operaciones realizó sus actividades correctamente en las difíciles condiciones creadas por el accidente. Sin embargo, la imposibilidad de obtener información fundamental sobre el estado de la planta y la necesidad de improvisar medidas de mitigación obstaculizaron la respuesta. La ausencia de prescripciones para la gestión de los accidentes severos en el marco regulador también contribuyó a la falta de preparación de la TEPCO. La Comisión de Seguridad Nuclear había publicado una guía sobre la gestión de accidentes en 1992 [23], y el mismo año el Ministerio de Comercio Internacional e Industria había publicado una Hoja de ruta para la gestión de accidentes. El Ministerio había solicitado también a las organizaciones explotadoras de centrales nucleares que adoptaran medidas para gestionar accidentes más graves que los considerados en el diseño inicial. Sin embargo, esto no era un requisito obligatorio, por lo que las disposiciones adoptadas voluntariamente por las organizaciones explotadoras fueron limitadas. La misión IRRS del OIEA al Japón en 2007 indicó la necesidad de prescripciones reglamentarias para los accidentes que sobrepasaran la base de diseño, y sugirió que el OSNI siguiera elaborando un enfoque sistemático para la consideración de esos sucesos, y también para el uso complementario de la evaluación probabilista de la seguridad y la gestión de accidentes severos [51]. Las sugerencias de la misión de examen no estimularon la adopción de nuevas medidas en esta esfera.

2.2.5. Evaluación de la eficacia reguladora

En la época del accidente, la regulación de la seguridad nuclear en el Japón corría a cargo de varias organizaciones con diferentes funciones y responsabilidades y con interrelaciones complejas. No estaba totalmente claro cuáles de ellas tenían la responsabilidad y la autoridad de emitir instrucciones vinculantes sobre cómo responder sin demora a las cuestiones de seguridad.

El programa de inspecciones reglamentarias tenía una estructura rígida, que reducía la capacidad del órgano regulador de verificar la seguridad en los momentos debidos y de detectar las posibles cuestiones nuevas de seguridad.

Los reglamentos, directrices y procedimientos existentes en la época del accidente no eran plenamente acordes con la práctica internacional en algunas áreas clave, especialmente en lo relativo a los exámenes periódicos de la seguridad, la revaluación de los peligros, la gestión de los accidentes severos y la cultura de la seguridad.

En el marco jurídico para la seguridad nuclear que se aplicaba en el Japón en la época del accidente, el Gobierno había establecido leyes principales, complementadas por leyes subsidiarias y ordenanzas y estatutos ministeriales. La estructura general del marco legislativo y regulador vigente en el momento del accidente se ilustra en las figuras 2.8 y 2.9. La estructura reguladora del Japón en esa época consistía en varios departamentos gubernamentales y otras organizaciones con responsabilidades en materia de seguridad nuclear. La estructura se había revisado dos veces, tras el incidente radiológico a bordo del buque nuclear Mutsu en 1974 y tras el accidente de criticidad de la instalación de la JCO en Tokaimura en 1999, pero algunas cuestiones fundamentales relacionadas con la aclaración de las funciones y responsabilidades no se habían abordado [53, 54]. La misión IRRS del OIEA en 2007 señaló la necesidad de mejorar, afinar y aclarar varios aspectos reglamentarios [51], como las normas relativas al tratamiento de los accidentes que sobrepasan la base de diseño y la aclaración de las funciones y responsabilidades del OSNI y de la Comisión de Seguridad Nuclear del Japón dentro del sistema regulador japonés.

El Ministerio de Economía, Comercio e Industria (MECI) era el responsable de la política sobre el desarrollo y la utilización de la energía nuclear, así como de la regulación de las instalaciones nucleares comerciales. Dentro del MECI, el Organismo de Recursos Naturales y Energía (ORNE) se encargaba de la supervisión del suministro de energía nacional, incluida la promoción de la energía nuclear. El OSNI se había establecido en 2001 como organismo especial adscrito al ORNE, y se le habían asignado las funciones de órgano regulador de la seguridad nuclear. La ley disponía que, en caso de conflicto entre la seguridad y la promoción, el Ministro del MECI debía dar prioridad a la seguridad. El MECI había establecido su Plan Estratégico Nacional sobre la base de esta priorización, y la misión del IRRS del OIEA en 2007 llegó a la conclusión de que el OSNI era efectivamente independiente del ORNE en la adopción de sus decisiones reguladoras. Sin embargo, la misión sugirió también que la independencia del OSNI respecto del MECI debería reflejarse más claramente en la legislación.

El Ministerio de Educación, Cultura, Deportes, Ciencia y Tecnología (MEXT) tenía asimismo responsabilidades reguladoras, que incluían la supervisión de la protección radiológica y las salvaguardias del material nuclear en las centrales nucleares, los reactores de investigación y ciertas instalaciones de investigación y desarrollo de la energía nucleoelectrónica. El Ministerio supervisaba también el Instituto Nacional de Ciencias Radiológicas (NIRS) y el Organismo de Energía Atómica del Japón (JAEA).

La Comisión de Seguridad Nuclear del Japón, situada en la Oficina del Gabinete y subordinada al Primer Ministro, era un órgano independiente con funciones consultivas y de supervisión en el marco de la reglamentación nuclear. La Comisión elaboraba y publicaba los documentos de política y las guías de reglamentación referentes a la seguridad nuclear que utilizaba el OSNI en su labor reguladora. La Comisión estaba legalmente facultada para pedir informes al OSNI, y supervisaba la labor de este. Además tenía su propio personal para realizar exámenes y evaluaciones independientes de las solicitudes de licencias para centrales nucleares y reconfirmar las conclusiones del OSNI. La misión IRRS del OIEA en 2007 señaló que la función del OSNI como órgano regulador en relación con la Comisión de Seguridad Nuclear debía aclararse.

El OSNI contaba con el apoyo de la Organización de Seguridad de la Energía Nuclear del Japón (JNES), que se había establecido en 2003 en virtud de una ley aprobada en 2002 [51]. Las principales funciones de la JNES consistían en realizar inspecciones en las instalaciones nucleares, examinar las

inspecciones periódicas de los titulares de licencias, apoyar la preparación para emergencias nucleares y coordinar los proyectos de investigación relacionados con la seguridad. Un órgano regulador necesita un programa de inspección amplio para poder determinar independientemente los problemas de seguridad de una central. En la época del accidente, a pesar de los esfuerzos del OSNI [56], las inspecciones en el Japón tenían una estructura rígida, y su tipo y frecuencia estaban determinados por ley. En 2011, el informe del Japón a la Convención sobre Seguridad Nuclear indicó que las actividades de gestión de la seguridad de las entidades explotadoras se regían por las inspecciones de la seguridad operacional que había aprobado el OSNI. El OSNI llevaba a cabo inspecciones trimestrales para comprobar que las entidades explotadoras cumplieran con su obligación de realizar exámenes periódicos de la seguridad. El OSNI y la JNES también realizaban inspecciones periódicas, a intervalos no superiores a 13 meses, del mantenimiento de las estructuras, sistemas y componentes de las centrales nucleares por las entidades explotadoras. Esa labor se concentraba en las estructuras, sistemas y componentes importantes para la seguridad, por ejemplo los del sistema de parada del reactor, la barrera de presión del refrigerante del reactor, el sistema de evacuación del calor residual y el sistema de contención. Estos procedimientos reglamentarios se sumaban a las visitas de inspección de las propias entidades explotadoras y a su gestión del mantenimiento de las instalaciones nucleares, sus evaluaciones periódicas de la seguridad y sus evaluaciones técnicas relacionadas con el envejecimiento de las centrales nucleares. El OSNI tenía escasa facultad para ampliar las inspecciones más allá del ámbito definido por la ley, lo que restringía su capacidad de detectar las deficiencias y desviaciones y de asegurarse de que se extrajeran las enseñanzas pertinentes [51]. Este enfoque limitaba la eficacia de la inspección reglamentaria en sus funciones de detectar las cuestiones de seguridad y verificar la seguridad de las actividades de los titulares de licencias y su cumplimiento de las prescripciones.

La Comisión de Seguridad Nuclear publicaba una serie de directrices que, en la práctica, se consideraban prescripciones [34]. Estas directrices se complementaban con las normas consensuadas publicadas por las sociedades profesionales y académicas. Sin embargo, en algunas esferas clave los reglamentos y directrices no se ajustaban plenamente a la práctica internacional en la época del accidente. Las diferencias más importantes se relacionaban con los exámenes periódicos de la seguridad, la reevaluación de los peligros, la gestión de accidentes severos y la cultura de la seguridad [52, 57, 58].

El examen periódico de la seguridad ofrece un mecanismo oficial para que los titulares de licencias y el órgano regulador reexaminen el diseño y los peligros externos a la luz de la nueva información de que se disponga y de las normas y la tecnología del momento [52]. En el Japón se debían realizar exámenes periódicos de la seguridad a intervalos de diez años en virtud del reglamento publicado en 2003 [51], cuyo alcance era limitado y no se ajustaba plenamente a la práctica internacional ya que no exigía la repetición de los exámenes de los peligros externos [51, 52, 58].

La misión IRRS del OIEA en 2007 señaló que el OSNI debía estar en condiciones de hacer una contribución importante al desarrollo de la reglamentación sobre la seguridad. También señaló que debía estar facultado para modificar su programa de inspecciones con flexibilidad a fin de optimizar su eficacia y especificidad, incluida la posibilidad de realizar inspecciones de la seguridad en los lugares y momentos que considerara oportunos [51]. La misión IRRS del OIEA sugirió también que el OSNI fomentara relaciones francas y abiertas con la industria nuclear y las organizaciones explotadoras para comunicar los problemas relacionados con la reglamentación directamente al nivel de la administración.

Legislación	Orden del Gabinete	Ordenanza Ministerial	Anuncio Público Ministerial
Ley Básica de Energía Atómica			
Ley de Reglamentación de Reactores	Orden del Gabinete para la Ley de Reglamentación de Reactores	Ordenanza Ministerial sobre los Reactores de Potencia Comerciales	Anuncio Público Ministerial sobre el Límite de Dosis basado en las Disposiciones de los Reactores de Potencia Comerciales
			Anuncio Público Ministerial sobre los Criterios relativos a las Personas Responsables de la Explotación
		Ordenanza Ministerial sobre los Reactores en la Fase de Investigación y Desarrollo	Anuncio Público Ministerial sobre los Detalles Técnicos del Transporte del Material de Combustible Nuclear, etc. en la Fábrica o el Establecimiento
			Anuncio Público Ministerial sobre el Equipo Importante relacionado con la Seguridad
Ley de Prevención de Peligros Radiológicos	Orden del Gabinete para la Ley de Prevención de Peligros Radiológicos	Ordenanza Ministerial sobre la Ley de Prevención de Peligros Radiológicos	Anuncio Público Ministerial sobre el Límite de Dosis basado en las Disposiciones de los Reactores en la Fase de Investigación y Desarrollo
Ley de Empresas de Electricidad	Orden del Gabinete para la Ley de Empresas de Electricidad	Ordenanza Ministerial sobre la Ley de Empresas de Electricidad	Anuncio Público Ministerial sobre los Requisitos Técnicos para la Dosis Equivalente, etc., debida a Radiación relacionada con Instalaciones de Generación de Energía Nucleoeléctrica
		Ordenanza Ministerial sobre el Establecimiento de Normas Técnicas para las Instalaciones de Generación de Energía Nucleoeléctrica	
		Ordenanza Ministerial sobre el Establecimiento de Requisitos Técnicos para el Material de Combustible Nuclear de la Generación de Energía Eléctrica	
Ley Básica de Contramedidas en Caso de Desastre			
Ley de Medidas Especiales relativas a la Preparación para Emergencias Nucleares	Orden del Gabinete para la aplicación de la Ley de Medidas Especiales relativas a la Preparación para Emergencias Nucleares	Ordenanza Ministerial sobre la aplicación de la Ley de Medidas Especiales relativas a la Preparación para Emergencias Nucleares	

Fig. 2.8. Marco legislativo y regulador para la seguridad de las instalaciones nucleares en el Japón en la época del accidente [55].

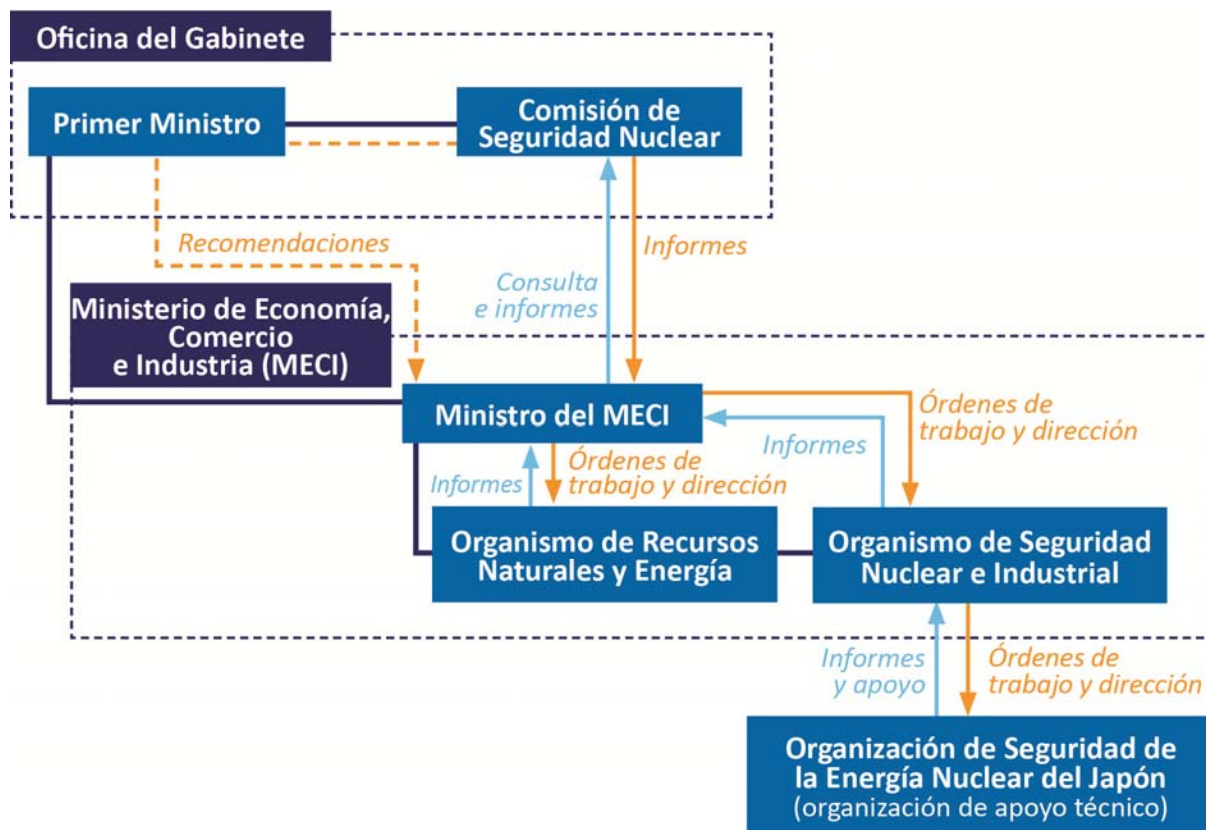


Fig. 2.9. Posición del OSNI en el Gobierno del Japón.

Establecimiento de la nueva autoridad reguladora

En septiembre de 2012 se estableció la Autoridad de Reglamentación Nuclear (ARN) [59]. La ARN efectuó un examen de las directrices y prescripciones reglamentarias relativas a la seguridad con la finalidad de formular normas nuevas para proteger a las personas y el medio ambiente. En 2013 entraron en vigor las nuevas prescripciones reglamentarias para las centrales nucleares. Tomando como base el concepto de la defensa en profundidad, se otorgó importancia a los niveles tres y cuatro y a la prevención de la pérdida simultánea de todas las funciones de seguridad debido a una causa común. Se revaluaron los supuestos anteriores relativos a los efectos de terremotos, tsunamis y otros sucesos externos, como las erupciones volcánicas, los tornados y los incendios forestales, y se examinaron las contramedidas para garantizar la seguridad nuclear si se producían esos sucesos externos. También se estudiaron contramedidas para casos de incendios e inundaciones dentro del emplazamiento, y mejoras de la fiabilidad del suministro eléctrico interno y exterior para hacer frente a la posibilidad de apagón en una central.

Además, se exigieron contramedidas para la respuesta a accidentes severos que pudieran provocar daños al núcleo, daños a la vasija de contención y la difusión de materiales radiactivos, medidas mejoradas para la inyección de agua en las piscinas de combustible gastado, contramedidas para casos de accidente aéreo y la instalación de un edificio para la respuesta de emergencia.

Como ejemplos de los nuevos requisitos reglamentarios establecidos a la luz del accidente de la central nuclear de Fukushima Daiichi cabe mencionar: 1) las prescripciones reforzadas respecto de la resistencia a terremotos y tsunamis; 2) las prescripciones nuevas o reforzadas respecto de la base de diseño; y 3) las prescripciones nuevas respecto de las medidas contra accidentes severos [60].

Se integraron en la ARN las funciones y responsabilidades que antes estaban asignadas a diferentes organizaciones gubernamentales. La ARN tiene competencia en una parte de las actividades del NIRS y del JAEA. La principal organización de apoyo técnico en materia de seguridad nuclear, la JNES, se fundió con la ARN el 1 de marzo de 2014.

La ARN ha adoptado un proceso de examen periódico de la seguridad que es acorde con las normas de seguridad del OIEA y que se implantó en diciembre de 2013. El sistema exige que los titulares de licencias de reactores nucleares de potencia realicen evaluaciones integrales de la seguridad de los reactores y, en el plazo de seis meses contados a partir del término de la inspección periódica, presenten a la ARN los resultados, que deben indicar lo siguiente:

- El cumplimiento de los requisitos reglamentarios;
- Las medidas adoptadas para mejorar la seguridad a título voluntario;
- La evaluación y el examen de los márgenes de seguridad para determinar la posibilidad de mejorarlos y una evaluación probabilista del riesgo;
- Una reevaluación integral sobre la base de estos resultados y los planes de acción para mejorar la seguridad.

El Japón solicitó al OIEA la realización de una misión IRRS hacia finales de 2015, con el objetivo de reforzar la seguridad nuclear y mejorar la competencia de la ARN como regulador nuclear independiente mediante un proceso de aprendizaje continuo, transparente y abierto.

2.2.6. Evaluación de los factores humanos y organizativos

Antes del accidente se daba por supuesto en el Japón que el diseño de las centrales nucleares y las medidas de seguridad que se habían establecido eran suficientemente robustos para resistir a los sucesos externos de baja probabilidad y grandes consecuencias.

Debido al supuesto básico de que las centrales nucleares del Japón eran seguras, las organizaciones y su personal tendían a no poner en duda el nivel de seguridad. Ese supuesto básico reforzado entre las partes interesadas de que el diseño técnico de las centrales nucleares era robusto creó una situación en que no se introducían mejoras de la seguridad con la debida prontitud.

El accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi demostró que, para determinar mejor las vulnerabilidades de una central, es necesario adoptar un enfoque integrado que tenga en cuenta las complejas interacciones de las personas, las organizaciones y la tecnología.

Antes del accidente no se detectó que no se había prestado suficiente atención a los sucesos externos de baja probabilidad y grandes consecuencias. Ello se debió en parte al supuesto básico imperante en el Japón, reforzado a lo largo de muchas décadas, de que la robustez del diseño técnico de las centrales nucleares proporcionaría suficiente protección contra los riesgos postulados. En consecuencia, los sucesos que condujeron al accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi no estaban previstos en los supuestos básicos de las organizaciones explotadoras, el órgano regulador y el Gobierno. Esos supuestos básicos influyeron en las decisiones y acciones de una amplia gama de partes interesadas, y no solo en las de los participantes directos en el funcionamiento y la reglamentación de las centrales nucleares.

Recuadro 2.9. Cultura de la seguridad

En el INSAG-4, una publicación del Grupo Internacional de Seguridad Nuclear (INSAG), la cultura de la seguridad se definió como el conjunto de características y actitudes de las organizaciones y personas que establece, como prioridad absoluta, que las cuestiones de seguridad de las centrales nucleares reciban la atención que merecen por su importancia [61].

Las publicaciones N° GS-G-3.5 de la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* [62] y N° 11 de la *Colección de Informes de Seguridad del OIEA* [63] dejan en claro que la cultura de la seguridad es en sí misma un subconjunto de la cultura de toda la organización, que comprende la mezcla de valores compartidos, actitudes y pautas de comportamiento que confieren a la organización su carácter particular.

Las organizaciones pasan normalmente por varias fases al desarrollar y fortalecer su cultura de la seguridad. En el volumen N° 11 de la *Colección de Informes de Seguridad* se distinguen las tres fases siguientes:

- 1) La seguridad es el resultado del grado de cumplimiento y se basa principalmente en las normas y reglamentos. En esta fase se considera que la seguridad es una cuestión técnica, y que para mantenerla basta cumplir con las normas y los reglamentos impuestos desde fuera.
- 2) El buen desempeño con respecto a la seguridad pasa a ser un objetivo de la organización y se gestiona principalmente mediante metas u objetivos de seguridad.
- 3) La seguridad se considera un proceso continuo de mejora al que todos pueden contribuir.

En realidad, las tres fases no están perfectamente diferenciadas y las organizaciones pueden ir más adelantadas en algunas partes del proceso de fortalecimiento de la cultura de la seguridad que en otras.

Los supuestos básicos influyeron en que el OSNI no ejerciera suficiente autoridad y, por ende, no fuera capaz de poner en tela de juicio otros supuestos relativos a la seguridad nuclear. El OSNI se vio obstaculizado en el cumplimiento de su función de supervisión por la falta de un marco regulador apropiado y también por limitaciones jurídicas explícitas [6, 51]. Por ejemplo, la misión IRRS del OIEA de 2007 determinó que los inspectores del OSNI no tenían acceso sin trabas a los locales de los titulares de licencias para realizar inspecciones, y solo podían efectuar esas inspecciones en determinados momentos. Debido al supuesto básico de que la robustez del diseño técnico proporcionaría suficiente protección contra los riesgos postulados, el OSNI trabajó en general de un modo menos integrador y más reactivo, centrándose en algunos casos en actividades a corto plazo, y no abordó las cuestiones más fundamentales y a largo plazo, como la consideración y aplicación de las normas de seguridad del OIEA. En algunos casos, la reglamentación no se actualizó, o no se realizaron simulacros de emergencias complejas, por temor a que la población quedara con la impresión de que las centrales nucleares no eran seguras, en contra del supuesto básico imperante [5].

El mismo supuesto básico de que las centrales nucleares eran seguras influyó también en las medidas adoptadas por la TEPCO, y le hizo confiar en la capacidad de las características técnicas de sus centrales para evitar accidentes nucleares severos. Esto se tradujo en la preparación insuficiente de la TEPCO para mitigar el accidente de marzo de 2011 [6, 7, 65]. El riesgo de que una inundación desencadenara un accidente nuclear no estaba previsto en el supuesto básico y, por ello, no se había seguido toda la orientación internacional más reciente sobre la gestión de accidentes severos [66]. El supuesto básico excluía también la posibilidad de un fallo de causa común que pudiera conducir a un apagón en múltiples unidades de una central.

El hecho de que las organizaciones competentes y su personal no cuestionaran o reexaminaran los supuestos básicos de la seguridad nuclear ilustra una deficiencia en la cultura de la seguridad. Como se indicó en el recuadro 2.9, en la tercera fase de un programa de cultura de la seguridad se toma consciencia de la necesidad de establecer un proceso de mejora continuo, que debería incluir la reconsideración periódica de la idoneidad de la seguridad nuclear. Una forma de poner en tela de juicio los supuestos básicos es adoptar un enfoque sistémico de la seguridad nuclear y entender la complejidad de todo el abanico de interacciones de los factores humanos, técnicos y organizativos. El hecho de no haber abordado suficientemente estas interacciones fue uno de los factores que contribuyeron al accidente, porque el supuesto básico no se detectó.

Recuadro 2.10. Supuestos básicos [64]

Para entender la cultura de la seguridad en su totalidad, deben determinarse los artefactos y comportamientos, los valores propugnados y los supuestos básicos que forman los tres niveles del concepto de cultura en lo que atañe a la seguridad. La aplicación del modelo en tres niveles a una organización específica reflejaría las características peculiares de esa organización y permitiría establecer nexos lógicos entre los artefactos, los valores propugnados y los supuestos básicos. Los nexos lógicos no quedan claros en los ejemplos ilustrativos que se dan a continuación, ya que estos no se han tomado de ninguna organización en particular.

Los artefactos son los más fáciles de observar, pero los más difíciles de interpretar. El conocimiento de los valores propugnados ayudará a entender su significado, pero solo cuando se comprendan los supuestos básicos se aclarará el significado de los componentes a nivel de los artefactos.

Artefactos y comportamientos: Arquitectura, rituales de saludo, vestimenta, formas de tratamiento: son visibles.

Valores propugnados: Estrategias, objetivos, filosofías: pueden averiguarse.

Supuestos básicos: Naturaleza humana, base del respeto por las personas: son inconscientes, y por lo general tácitos.

Los supuestos básicos son el nivel más profundo de la cultura. Son creencias fundamentales que se dan por sentado hasta el punto de que la mayoría de las personas de un grupo cultural se adhiere a ellas, pero no de forma consciente. Para comprender cualquier cultura es necesario desvelar los supuestos básicos que están operando. En el caso de una organización, esos supuestos también reflejarán su historia, y los valores, creencias y suposiciones de los fundadores y de los principales dirigentes que hicieron posible su éxito. Es poco frecuente que los supuestos básicos se discutan y cuestionen, y cambiarlos es sumamente difícil.

Recuadro 2.11. Enfoque sistémico de la seguridad [67]

El enfoque sistémico de la seguridad toma en consideración el sistema completo y examina las interacciones dinámicas de todos los factores pertinentes del sistema, a saber, los factores humanos (como los conocimientos, las ideas, las decisiones y las acciones), los factores técnicos (como la tecnología, los instrumentos o el equipo) y los factores organizativos (como el sistema de gestión, la estructura orgánica, la gobernanza o los recursos).

El enfoque sistémico de la seguridad trata este sistema complejo de interacciones como un todo. Por ejemplo, entre los factores que es importante considerar en una central nuclear figuran los que se relacionan con las personas, como los conocimientos, las decisiones, las ideas, las emociones y las acciones. Los factores técnicos comprenden los aspectos físicos de la central nuclear y la variedad de instrumentos y equipos técnicos que se utilizan para su funcionamiento. Los factores organizativos incluyen el sistema de gestión, la estructura orgánica, la gobernanza de la central y los recursos humanos y financieros. La consideración de la interacción de todos los factores humanos, técnicos y organizativos revela la complejidad y el carácter no lineal de las operaciones en una central nuclear. Es necesario examinar mejor cómo interactúan entre sí los puntos débiles y fuertes de todos estos factores a fin de reducir o eliminar los riesgos de forma proactiva.

La tendencia de la mayoría de los interesados a no cuestionar la idoneidad de las características de seguridad de la central reforzó el supuesto de que la robustez del diseño técnico y las medidas de seguridad existentes serían suficientes para protegerla. El resultado de ello fue que no se introdujeron de manera proactiva y rápida las mejoras de la seguridad necesarias [5 a 7].

Los operadores que respondieron directamente en las primeras fases del accidente tuvieron que actuar en circunstancias extremas. La ansiedad y el estrés causados por las medidas que tenían que adoptar se vieron agravados por el hecho de que en muchos casos no disponían de información sobre la seguridad de sus familiares o sobre el estado de sus hogares. Las personas que se encontraban en el emplazamiento no sabían cómo evolucionaría el accidente, lo que creó una incertidumbre considerable; a pesar de ello, hicieron todo lo posible por proteger a la población y el medio ambiente. Los operadores se vieron

enfrentados a una situación sin precedentes: la necesidad de gestionar un accidente en múltiples unidades, durante una crisis nacional y con una infraestructura gravemente dañada. Ello creó un entorno de trabajo sumamente adverso desde los puntos de vista físico y psicológico.

La interacción de los factores humanos, organizativos y técnicos de todas las organizaciones interesadas y entre los diferentes niveles de cada una de ellas se produce dentro del ámbito más amplio de la cultura de la seguridad de la organización, y por lo tanto refleja esa cultura de la organización. Con un enfoque sistémico de la seguridad que analice los factores humanos, organizativos y técnicos, una organización puede estar mejor preparada para un suceso imprevisto. La seguridad nuclear dependerá también de las actitudes y los comportamientos de las personas [67]. Los factores humanos y organizativos que hacen que no se cuestionen o examinen los supuestos básicos de la seguridad pueden inducir a las organizaciones o a las personas a adoptar decisiones y realizar acciones que comprometan inadvertidamente la seguridad nuclear. Es importante tener presentes esos supuestos básicos y esforzarse por comprender sus repercusiones en la seguridad nuclear.

2.3. OBSERVACIONES Y LECCIONES APRENDIDAS

De la evaluación de las consideraciones de seguridad nuclear relacionadas con el accidente se desprenden varias observaciones y enseñanzas.

- **La evaluación de los peligros naturales debe ser suficientemente prudente. La consideración de datos principalmente históricos al establecer la base de diseño de las centrales nucleares no es suficiente para caracterizar los riesgos de los peligros naturales extremos. Incluso cuando se dispone de amplios datos, el hecho de que los períodos de observación sean relativamente breves hace que la predicción de los peligros naturales esté sujeta a grandes incertidumbres.**

Los sucesos naturales extremos que tienen una probabilidad muy baja de ocurrir pueden tener consecuencias importantes, y la predicción de los peligros naturales extremos sigue siendo difícil y controvertida a causa de las incertidumbres. Además, esas predicciones pueden cambiar durante la vida de una central nuclear a medida que se dispone de más información y los métodos de análisis mejoran. Por consiguiente, es necesario utilizar todos los datos disponibles pertinentes, tanto nacionales como internacionales, para asegurar una predicción fiable de los peligros, definir una base de diseño fiable y realista respecto de los sucesos naturales extremos, y diseñar centrales nucleares con márgenes de seguridad suficientes.

- **La seguridad de las centrales nucleares debe reevaluarse periódicamente para tener en cuenta los adelantos en los conocimientos, y las medidas correctivas o compensatorias necesarias deben adoptarse con prontitud.**

El programa de examen periódico de la seguridad en la central nuclear de Fukushima Daiichi no condujo a mejoras de la seguridad sobre la base de las prescripciones reglamentarias. La TEPCO realizó la reevaluación de forma voluntaria teniendo en cuenta los adelantos en los conocimientos, con inclusión de informaciones y datos nuevos. Cuando una estimación revisada de un peligro sobrepase las predicciones anteriores, es importante garantizar la seguridad de la instalación aplicando medidas correctivas provisionales que respondan a la nueva estimación del peligro mientras se evalúa la exactitud del valor revisado. Si se confirma la exactitud de la estimación de un nuevo peligro, la organización explotadora y la autoridad reguladora deben acordar un calendario y un plan de acción completo para implantar prontamente las disposiciones necesarias para responder a ese peligro mayor y garantizar la seguridad de la central.

- **En la evaluación de los peligros naturales se deben tener en cuenta las posibilidades de que estos ocurran de forma combinada, ya sea simultánea o secuencialmente, y sus efectos combinados en una central nuclear. En esa evaluación se deben tener en cuenta también los efectos en distintas unidades de una central nuclear.**

El accidente nuclear de Fukushima Daiichi demostró la necesidad de investigar a fondo el potencial de que una combinación de peligros naturales afecte a distintas unidades de una central

nuclear. Al examinar las medidas de mitigación de accidentes y de recuperación es preciso tener en cuenta los complejos escenarios que se derivan de la combinación de peligros naturales.

- **Los programas de experiencia operativa deben incluir la experiencia de fuentes nacionales e internacionales. Las mejoras de la seguridad definidas por medio de esos programas deben aplicarse sin demora. Es preciso evaluar de forma periódica e independiente el uso de la experiencia operativa.**

El programa de evaluación de la experiencia operativa en la central nuclear de Fukushima Daiichi no condujo a cambios en el diseño que tuvieran en cuenta la experiencia nacional e internacional en relación con las inundaciones. El examen de la experiencia operativa debe constituir una parte estándar de los procesos de supervisión de las centrales, teniendo en cuenta las fuentes pertinentes, como el Sistema de Notificación de Incidentes del OIEA y la Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE. Los órganos reguladores deben llevar a cabo exámenes independientes de la experiencia operativa nacional e internacional a fin de confirmar que las organizaciones explotadoras estén adoptando medidas concretas para mejorar la seguridad.

- **El concepto de la defensa en profundidad sigue siendo válido, pero su aplicación debe reforzarse en todos los niveles mediante una adecuada independencia, redundancia, diversidad y protección contra los peligros internos y externos. Es preciso centrarse no solo en la prevención de los accidentes, sino también en la mejora de las medidas de mitigación.**

La inundación resultante del tsunami inutilizó simultáneamente los tres primeros niveles de protección de la defensa en profundidad, lo que provocó fallos de causa común de los equipos y sistemas. Incluso en esta situación los operadores fueron capaces de aplicar estrategias de mitigación eficaces, aunque con retraso. Todos los niveles de la defensa en profundidad relacionados con la prevención y la mitigación de accidentes deberían reforzarse con una adecuada independencia, redundancia, diversidad y protección, para que no puedan quedar inutilizados simultáneamente por un peligro externo o interno y no estén expuestos a un fallo de causa común. La aplicación del concepto de la defensa en profundidad debe reexaminarse periódicamente a lo largo de la vida útil de una central nuclear para asegurarse de que se comprende cualquier cambio en la vulnerabilidad de los sucesos externos y que se efectúan e implementan los cambios que corresponda al diseño. Es necesario que los exámenes periódicos de la seguridad incluyan los peligros externos extremos, porque esos peligros puede provocar fallos de causa común capaces de comprometer simultáneamente varios niveles de la defensa en profundidad.

- **Los sistemas de instrumentación y control que sean necesarios durante los accidentes que sobrepasen la base de diseño tienen que mantenerse en condiciones de funcionar a fin de monitorizar los parámetros esenciales de la seguridad de la central y facilitar las operaciones en la planta.**

La pérdida de la instrumentación y el control durante el accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi dejó a los operadores casi sin indicaciones de las condiciones reales en la central. La pérdida de los sistemas de instrumentación y control menoscabó gravemente los esfuerzos por evitar un accidente severo o mitigar sus consecuencias. El alcance y la naturaleza de los sistemas de instrumentación y control necesarios deben definirse cuidadosamente, con arreglo a las características del diseño de la central, incluidas las piscinas de combustible gastado. Los sistemas deben estar protegidos de forma que estén disponibles cuando haga falta. Esto también demostró la necesidad de mejorar las estrategias para poder controlar manualmente el equipo crucial.

- **Deben establecerse sistemas de refrigeración robustos y fiables para la evacuación del calor residual, que puedan funcionar tanto en las condiciones previstas en la base de diseño como en las que sobrepasen esa base.**

En la central nuclear de Fukushima Daiichi, los operadores pudieron finalmente, con algún retraso, desplegar equipo portátil para inyectar agua en los reactores. Los sistemas de refrigeración basados en equipo fijo o portátil tienen que someterse a cualificaciones y ensayos para cerciorarse de que estén en condiciones de funcionar y los operadores los puedan utilizar cuando sea necesario.

- **Debe asegurarse una función de confinamiento fiable para los accidentes que sobrepasen la base de diseño, a fin de evitar una emisión importante de material radiactivo al medio ambiente.**

En la central nuclear de Fukushima Daiichi, la falta de venteo de la contención y el posterior fallo del edificio del reactor debido a la explosión de hidrógeno provocaron una emisión importante de material radiactivo al medio ambiente. La función de confinamiento debe evaluarse a fin de cerciorarse de que en el diseño del equipo destinado a mantener la integridad del sistema de confinamiento se tengan en cuenta todos los peligros posibles.

- **Deben realizarse análisis de seguridad probabilistas y deterministas completos para confirmar la capacidad de una planta de soportar los accidentes fuera de la base de diseño que correspondan, y para establecer un alto grado de confianza en la robustez del diseño de la central.**

Los análisis de la seguridad pueden utilizarse tanto para evaluar como para elaborar las estrategias de respuesta a accidentes que sobrepasen la base de diseño, y pueden incluir el empleo de métodos deterministas y probabilistas. Los estudios de evaluación probabilista de la seguridad realizados en la central nuclear de Fukushima Daiichi tuvieron un alcance limitado y no consideraron la posibilidad de una inundación por fuentes internas o externas. Las limitaciones de estos estudios contribuyeron a que los operadores dispusieran de procedimientos incompletos para la gestión del accidente.

- **Las disposiciones para la gestión de accidentes deben ser amplias y estar bien diseñadas y actualizadas. Deben derivarse a partir de un conjunto completo de sucesos iniciadores y condiciones de la central, y también deben prever accidentes que afecten a varias unidades de una central con múltiples reactores.**

Los procedimientos de gestión de accidentes de que disponían los operadores en la central nuclear de Fukushima Daiichi no tenían en cuenta la posibilidad de un accidente en múltiples unidades, y no contenían orientación para el caso de pérdida completa del suministro eléctrico. Las disposiciones para la gestión de accidentes deben basarse en un análisis específico de la central realizado mediante una combinación de métodos deterministas y probabilistas. En la orientación y los procedimientos para la gestión de accidentes debe tomarse en consideración la posibilidad de que se produzcan sucesos en varias unidades simultáneamente y en las piscinas de combustible gastado. También se debe tener en cuenta la posibilidad de una perturbación de la infraestructura regional, que incluya graves deficiencias en la comunicación, el transporte y los servicios públicos. Las disposiciones para la gestión de accidentes deberían tomar en consideración asimismo la mejor orientación disponible a nivel internacional, y deberían actualizarse periódicamente para tener en cuenta la nueva información.

- **La capacitación, los ejercicios y los simulacros deben incluir las condiciones postuladas para un accidente severo a fin de asegurarse de que los operadores estén preparados lo mejor posible. Ello debe comprender el uso simulado del equipo real que se desplegaría en la gestión de un accidente severo.**

Los operadores de la central nuclear de Fukushima Daiichi no habían recibido capacitación específica en el manejo manual de sistemas tales como el condensador de aislamiento de la Unidad 1 y los camiones de bomberos como fuente alternativa para la inyección de agua a baja presión. En la capacitación del personal debe prestarse especial atención a las medidas que se pueden adoptar en condiciones de pérdida prolongada de toda la alimentación eléctrica, con escasa información sobre el estado de la central y ausencia total de información sobre parámetros de seguridad importantes. La capacitación del personal, los ejercicios y los simulacros deben simular de manera realista la progresión de los accidentes severos, incluida la posibilidad de que el accidente afecte a varias unidades de un mismo emplazamiento. En la capacitación, los ejercicios y los simulacros deben participar no sólo el personal encargado de la gestión de accidentes en el emplazamiento, sino también todo el personal que intervendrá en la respuesta fuera del emplazamiento, en la organización explotadora y a nivel local, regional y nacional.

- **Para lograr una supervisión reglamentaria eficaz de la seguridad de las instalaciones nucleares, es esencial que el órgano regulador sea independiente y posea autoridad legal, competencia técnica y una sólida cultura de la seguridad.**

El OSNI no tenía suficiente autoridad para adoptar las medidas necesarias, incluidas las inspecciones de las instalaciones reglamentadas. Es esencial que el órgano regulador pueda tomar decisiones independientes sobre la seguridad durante todo el tiempo de vida de las instalaciones. Para poder adoptar esas decisiones independientes, el órgano regulador debe ser competente y poseer suficientes recursos humanos, una adecuada autoridad legal —incluido el derecho a suspender la explotación y/o a imponer mejoras de la seguridad a la organización explotadora— y suficientes recursos financieros. El órgano regulador debe estar facultado para adaptar su programa de inspecciones cuando se disponga de información nueva sobre la seguridad. También debe poder asegurarse de que las prescripciones reglamentarias nacionales y las directrices correspondientes para evaluar la seguridad de las instalaciones nucleares se revisen periódicamente de conformidad con las novedades científicas y técnicas, la experiencia operacional y las normas y prácticas internacionales.

- **A fin de promover y reforzar la cultura de la seguridad, las personas y organizaciones deben cuestionar o reexaminar continuamente los supuestos reinantes con respecto a la seguridad nuclear, y las consecuencias de las decisiones y medidas que puedan repercutir en ella.**

Para ello, las personas y organizaciones deben adoptar una actitud de cuestionamiento a fin de determinar la naturaleza, los límites y las posibles amenazas de sus supuestos comunes sobre la seguridad nuclear. La institucionalización de un diálogo continuo, entre las diferentes organizaciones y dentro de cada una de ellas, sobre las cuestiones relacionadas con la seguridad nuclear y su importancia y repercusión en las decisiones y medidas adoptadas es un elemento esencial. Las evaluaciones periódicas de la cultura de la seguridad pueden contribuir al fomento de la reflexión y el diálogo sobre los supuestos básicos.

- **En un enfoque sistémico de la seguridad deben tomarse en consideración las interacciones de los factores humanos, organizativos y técnicos. Este enfoque debe adoptarse durante todo el ciclo de vida de las instalaciones nucleares.**

El accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi demostró que es difícil determinar las vulnerabilidades de los sistemas que entrañan interacciones complejas de las personas, las organizaciones y la tecnología, porque el supuesto básico relativo a la seguridad nuclear puede no detectarse. Se necesita un enfoque sistémico que incluya las consideraciones humanas, tecnológicas y organizativas para entender el funcionamiento y la interacción de los componentes del sistema global en las condiciones tanto de funcionamiento normal como de accidente.

3. PREPARACIÓN Y RESPUESTA EN SITUACIONES DE EMERGENCIA

En esta sección se describen los sucesos más importantes y las principales medidas de respuesta adoptadas desde el inicio del accidente, el 11 de marzo de 2011. También se examinan el sistema nacional de preparación y respuesta en situaciones de emergencia que existía en el Japón antes del accidente, y el marco internacional para la preparación y respuesta en situaciones de emergencia.

En el recuadro 3.1 se resumen los principales requisitos internacionales relativos a la preparación para responder a una emergencia nuclear que existían antes del accidente.

Recuadro 3.1. Principales requisitos relativos a la preparación para responder a una emergencia nuclear existentes en las normas de seguridad del OIEA antes del accidente

Las normas de seguridad del OIEA [68, 69] en vigor antes del accidente exigían lo siguiente:

1) la aplicación de un enfoque que incluyera todos los peligros al elaborar las disposiciones de preparación y respuesta⁶³; 2) el desarrollo de un sistema de clasificación de emergencias basado en condiciones observables y criterios mensurables (niveles de actuación de emergencia) y el pronto inicio de la aplicación de las medidas protectoras urgentes predeterminadas para salvaguardar a la población (en las zonas previamente definidas) una vez que la entidad explotadora hubiera clasificado la emergencia; 3) el establecimiento de zonas de emergencia para toda la variedad de emergencias posibles, incluidas las de baja probabilidad; 4) el establecimiento de disposiciones para la aplicación de medidas protectoras dentro de las zonas de emergencia y fuera de ellas, según procediera; 5) el establecimiento de criterios nacionales para la adopción de decisiones sobre las medidas de protección de la población (evacuación, orden de permanecer en espacios interiores, bloqueo de la tiroides con yodo, reubicación, restricción del consumo y la distribución de alimentos y de agua potable, monitorización y descontaminación de la población) expresados en dosis y cantidades mensurables (niveles de intervención operacional), teniendo en cuenta una variedad de factores (como los aspectos financieros y sociales); 6) la adopción de disposiciones para llevar a cabo la monitorización radiológica, y la obtención y evaluación de muestras ambientales con el fin de determinar con prontitud los peligros nuevos y afinar la estrategia de respuesta; 7) la determinación, en la fase de preparación, de los grupos de población especiales que se encontraran dentro de las zonas de emergencia (por ejemplo, las personas con discapacidad y los pacientes hospitalizados) y respecto de los cuales hubiera que adoptar disposiciones específicas; 8) el establecimiento de disposiciones para los trabajadores de emergencias, en particular la definición de criterios de dosis para los diferentes tipos de tareas, la designación de los trabajadores de emergencias y la garantía de su protección, el establecimiento de orientaciones para la gestión, el control y el registro de las dosis que recibieran, y la provisión de equipos de protección, procedimientos y capacitación especializados; 9) la planificación de la transición de la fase de emergencia a las operaciones de recuperación a largo plazo y la reanudación de las actividades sociales y económicas normales, mediante la asignación clara de responsabilidades, la difusión y transferencia de información, la evaluación de las consecuencias, el establecimiento de procesos oficiales para adoptar decisiones respecto del levantamiento de las restricciones y de otras disposiciones impuestas durante la emergencia, el establecimiento de los principios y criterios pertinentes y la consulta con la población; 10) la clara asignación de funciones, responsabilidades y atribuciones respecto de la preparación y respuesta en situaciones de emergencia en todos los niveles, como parte de los planes de emergencia; 11) el establecimiento de relaciones e interfaces de organización entre las entidades explotadoras y las encargadas de la respuesta, y la preparación de protocolos operacionales para coordinar la respuesta a la emergencia en todos los niveles; 12) la elaboración y coordinación de planes y procedimientos de emergencia en todos los niveles sobre la base de los peligros evaluados; 13) la preparación del apoyo logístico mediante la provisión de herramientas, instrumentos, suministros, equipo, sistemas de comunicación, instalaciones funcionales específicas y documentación, incluida la planificación de la operabilidad y funcionalidad de esos artículos e instalaciones en las condiciones radiológicas, de trabajo y ambientales postuladas para la respuesta a la emergencia; 14) la planificación y realización de actividades de capacitación, simulacros y ejercicios; y 15) el establecimiento de un programa de garantía de la calidad para asegurarse de que todos los suministros, equipos, sistemas de comunicación, instalaciones, documentación y demás elementos estuvieran actualizados, disponibles y operativos en todo momento para su uso en una emergencia.

⁶³ ‘Disposiciones’: Conjunto integrado de elementos infraestructurales necesarios para proporcionar la capacidad de desempeñar una determinada función o tarea requerida en la respuesta a una emergencia nuclear o radiológica. Estos elementos pueden abarcar las atribuciones y responsabilidades, la organización, la coordinación, el personal, los planes, los procedimientos, las instalaciones, el equipo y la capacitación.

En el recuadro 3.2 se resumen los tipos de medidas protectoras que se adoptan en una emergencia nuclear.

Recuadro 3.2. Tipos de medidas de protección que se adoptan en una emergencia nuclear [48, 69]

Las ‘**medidas de mitigación**’ son las medidas adoptadas de inmediato para reducir las posibilidades de que se creen condiciones que den lugar a una situación de exposición o a una emisión de materiales radiactivos que requieran la adopción de medidas de emergencia en el emplazamiento o fuera de él, o para mitigar las condiciones en la central que puedan dar lugar a una situación de exposición o a una emisión de materiales radiactivos que requieran la adopción de medidas de emergencia en el emplazamiento o fuera de él.

Las ‘**medidas protectoras urgentes**’ son las medidas que deben adoptarse con prontitud (normalmente en las primeras horas) para que sean eficaces. Las medidas protectoras urgentes más comunes en el caso de una emergencia nuclear son la evacuación, la orden de permanecer en espacios interiores, el bloqueo de la tiroides con yodo, la restricción del consumo de alimentos potencialmente contaminados y la descontaminación de las personas.

Las ‘**medidas protectoras tempranas**’ son las medidas que, para que sean eficaces, deben adoptarse en el plazo de días o semanas. Estas medidas pueden ser de larga duración y continuar incluso después de terminada la emergencia. A diferencia de lo que ocurre con las medidas protectoras urgentes, en general es posible basar estas medidas en los resultados de una monitorización que tenga en cuenta la naturaleza específica del material radiactivo emitido y su dispersión en el medio ambiente. Son ejemplos de medidas protectoras tempranas la reubicación de la población, las restricciones impuestas al consumo de alimentos y agua potable, y la introducción de controles en la agricultura.

3.1. RESPUESTA INICIAL AL ACCIDENTE EN EL JAPÓN

En la época del accidente, había disposiciones separadas para responder a las emergencias nucleares y a los desastres naturales a nivel nacional y local. No existían disposiciones coordinadas para responder a una emergencia nuclear y un desastre natural que se produjeran simultáneamente.

Las disposiciones de respuesta a las emergencias nucleares preveían que, cuando se detectaran determinadas condiciones adversas en una central nuclear (por ejemplo, la interrupción de todo el suministro eléctrico de corriente alterna durante más de cinco minutos o la pérdida total de la capacidad de refrigerar el reactor), se enviaría una notificación a la administración local y al gobierno nacional. El gobierno nacional evaluaría entonces la situación y determinaría si debía clasificarse como una ‘emergencia nuclear’.⁶⁴ Si la situación se clasificaba como emergencia nuclear, se emitiría una declaración a ese efecto a nivel nacional y se adoptarían decisiones respecto de las medidas protectoras necesarias, sobre la base de las dosis proyectadas.

Basándose en un informe recibido de la central nuclear de Fukushima Daiichi, al final de la tarde del 11 de marzo el Gobierno nacional declaró una emergencia nuclear y ordenó la adopción de medidas para proteger a la población. La respuesta a nivel nacional fue dirigida por el Primer Ministro y por altos funcionarios de la Oficina del Primer Ministro en Tokio.

Las consecuencias del terremoto y del tsunami y el aumento de los niveles de radiación dificultaron enormemente la respuesta en el emplazamiento. Debido a la pérdida del suministro de corriente alterna y continua, a la presencia de grandes cantidades de escombros que entorpecían las medidas de respuesta en el emplazamiento, a las réplicas y las alertas de nuevos tsunamis y al aumento de

⁶⁴ Ley de Medidas Especiales relativas a la Preparación para Emergencias Nucleares, Ley N° 156 de 1999, en su versión enmendada más recientemente por la Ley N° 118 de 2006, denominada en adelante Ley de Emergencias Nucleares.

los niveles de radiación, muchas medidas de mitigación no se pudieron aplicar en el momento debido. El Gobierno nacional participó en las decisiones sobre la adopción de medidas de mitigación en el emplazamiento.

Los extensos daños a la infraestructura causados por el terremoto y el tsunami dificultaron la activación del Centro Externo para emergencias, situado fuera del emplazamiento, a 5 km de la central nuclear de Fukushima Daiichi. Pocos días después, las condiciones radiológicas adversas obligaron a evacuar el Centro Externo.

La base jurídica principal del sistema nacional de preparación y respuesta en situaciones de emergencia del Japón figura en la Ley Básica de Contramedidas en Caso de Desastre [70] y en la Ley de Medidas Especiales relativas a la Preparación para Emergencias Nucleares [19] (recuadro 3.3).

Recuadro 3.3. Principales documentos que definían el sistema nacional de preparación y respuesta ante una emergencia nuclear en el Japón en la época del accidente

Base jurídica nacional			
Ley Básica de Contramedidas en Caso de Desastre*		Ley de Medidas Especiales relativas a la Preparación para Emergencias Nucleares	
Base de la planificación nacional			
Plan Básico de Gestión de Desastres*	Orden para la aplicación de la Ley de Medidas Especiales relativas a la Preparación para Emergencias Nucleares	Ordenanza sobre la aplicación de la Ley de Medidas Especiales relativas a la Preparación para Emergencias Nucleares	Guía de Reglamentación sobre la Preparación para Emergencias en Instalaciones Nucleares
Planes y manuales operacionales			
Nacionales	Plan de Operaciones para la Gestión de Desastres*	Manual para la Respuesta a una Emergencia Nuclear	
De las prefecturas/ ciudades/pueblos/aldeas	Planes de gestión de desastres de las prefecturas/ ciudades/pueblos/aldeas*	Manuales nucleares de las prefecturas/ ciudades/pueblos/aldeas	
De los explotadores	Planes de acción de emergencia de los explotadores de centrales nucleares	Manuales de respuesta a emergencias de los explotadores de centrales nucleares	
* Estos documentos se refieren a diversos tipos de desastres, incluidas las emergencias nucleares			

3.1.1. Notificación

El artículo 10 de la Ley de Emergencias Nucleares disponía que la central nuclear debía enviar una notificación a la administración local y al gobierno nacional [19] cuando se registrasen determinados ‘sucesos específicos’ predefinidos, tales como el fallo de todo el suministro eléctrico de corriente alterna durante más de cinco minutos [55]. En virtud del artículo 15 de la Ley de Emergencias Nucleares, se enviaría un informe de ‘emergencia nuclear’ cuando se alcanzaran o superaran ciertos criterios predefinidos, tales como la pérdida total de la capacidad de refrigerar el reactor [21, 71].

Se entendía que tras la notificación de un suceso en virtud del artículo 10 se remitiría el informe del suceso previsto en el artículo 15 [72]. Al recibir la notificación, el gobierno nacional realizaría una evaluación y decidiría si el suceso constituía una ‘emergencia nuclear’. Si este fuera el caso, se informaría al Primer Ministro y se le presentaría un proyecto de declaración de ‘emergencia nuclear’.

Sería responsabilidad del Primer Ministro decidir declarar una ‘emergencia nuclear’ y emitir órdenes⁶⁵ y/o formular recomendaciones para la adopción de medidas de protección de la población [73].

En la figura 3.1 se resumen las principales medidas que había que adoptar si un suceso correspondía a lo dispuesto en el artículo 10 y/o el artículo 15 de la Ley de Emergencias Nucleares [19, 70, 73 a 75].

La ola del tsunami que inundó la central nuclear de Fukushima Daiichi llegó a las 15.36 horas del 11 de marzo de 2011 [10]. La notificación por la que la central señaló un ‘suceso específico’ en las Unidades 1 a 5 en aplicación del artículo 10 de la Ley de Emergencias Nucleares [19] fue transmitida al Gobierno nacional y a la administración local a las 15.42 horas del 11 de marzo, seguida a las 16.45 horas de un informe sobre un suceso en las Unidades 1 y 2 clasificado como ‘emergencia nuclear’ en virtud del artículo 15 de la Ley [3, 8, 76, 77].

El tipo de ‘suceso específico’ notificado en virtud del artículo 10 fue un ‘apagón de la central’ que afectó a las Unidades 1 a 5 [76]. El tipo de suceso notificado como ‘emergencia nuclear’ en virtud del artículo 15 fue inicialmente la “incapacidad de inyectar agua del sistema de refrigeración de emergencia del núcleo” en las Unidades 1 y 2 [77]. Tras recibir la notificación, el Gobierno nacional evaluó la situación y decidió que esta constituía una ‘emergencia nuclear’ [6].

El Primer Ministro emitió una declaración de emergencia nuclear a las 19.03 horas, más de dos horas después de que la central nuclear de Fukushima Daiichi notificara, respecto de las Unidades 1 y 2, un suceso clasificado como ‘emergencia nuclear’ en virtud del artículo 15 de la Ley, y tras largas deliberaciones entre funcionarios que se encontraban fuera del emplazamiento [3].

3.1.2. Medidas de mitigación

De conformidad con el Manual para la Respuesta a Desastres de la TEPCO, alrededor de 15 minutos después del terremoto se estableció en la central nuclear de Fukushima Daiichi un centro de respuesta a la emergencia encabezado por el Superintendente del emplazamiento [6, 8]. El centro se estableció en el edificio ‘sísmicamente aislado’, que tenía características especiales, tales como un suministro autónomo de energía eléctrica y sistemas de ventilación dotados de dispositivos de filtro. Ese edificio se había construido⁶⁶ a raíz de las enseñanzas extraídas de la experiencia en la central nuclear de Kashiwazaki-Kariwa tras el terremoto de Niigata Chuetsu-Oki de 2007, y su uso hizo posible la adopción de medidas de mitigación durante toda la respuesta al accidente [8].

Las disposiciones en vigor antes del accidente prevenían que, en caso de necesidad, el centro de respuesta a la emergencia en el emplazamiento pediría apoyo a la sede de la TEPCO, utilizando los medios de esta o los recursos que facilitarían otras entidades explotadoras de centrales nucleares, en virtud del Acuerdo de Cooperación entre los Explotadores de Centrales Nucleares del Japón [8, 75].

Tras recibir una petición de la central nuclear de Fukushima Daiichi, otras centrales nucleares japonesas (no explotadas por la TEPCO) pusieron a disposición personal y equipo adicionales para apoyar la respuesta de emergencia dentro del emplazamiento. Sin embargo, los extensos daños causados a la infraestructura de transporte por el terremoto y el tsunami, además de la insuficiente planificación previa, menoscabaron la eficacia de ese apoyo. Por ejemplo, en algunos casos en que las peticiones de equipo no especificaban adecuadamente lo que se necesitaba, se adquirió equipo que no era compatible con el de la central (por falta de correspondencia entre los accesorios, conectores, etc.) [8].

⁶⁵ En la Ley de Emergencias Nucleares [19] y la Ley Básica de Contramedidas en Caso de Desastre [70] se utilizan los términos ‘instrucciones’ y ‘recomendaciones’ en relación con las medidas protectoras. Las ‘instrucciones’ tienen carácter obligatorio y la población tiene que respetarlas. Las ‘recomendaciones’ son solo sugerencias y, por lo tanto, no es obligatorio cumplirlas. Sin embargo, para mayor claridad, en el presente informe se utilizará el término ‘órdenes’ como equivalente de ‘instrucciones’.

⁶⁶ El edificio se había empezado a construir en marzo de 2009 y había entrado en funcionamiento en julio de 2010.

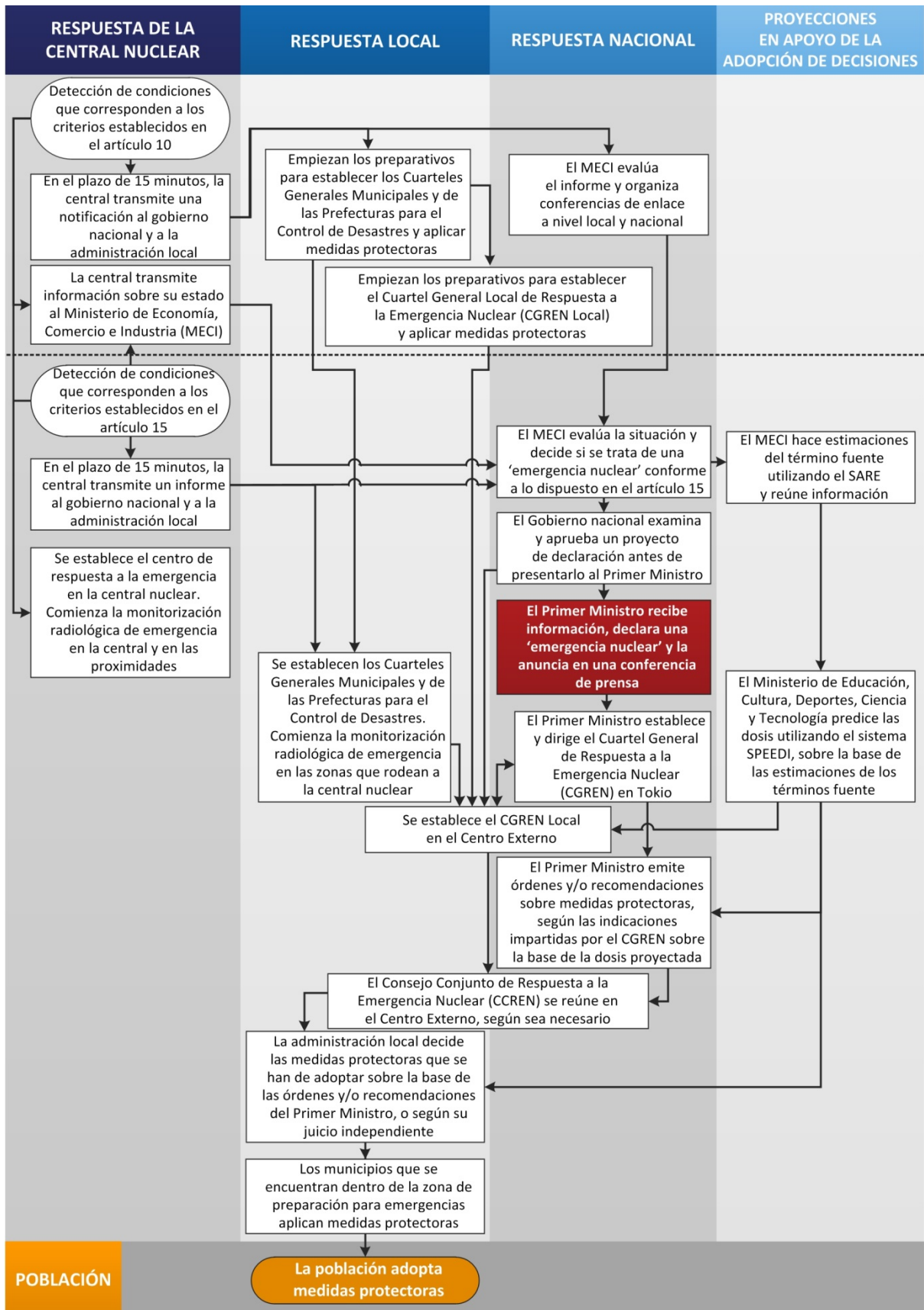


Fig. 3.1. Principales medidas que había que adoptar si un suceso correspondía a lo dispuesto en el artículo 10 y/o el artículo 15 de la Ley de Emergencias Nucleares, según la planificación anterior al accidente (sobre la base de las referencias [19, 70, 73 a 75]).

En respuesta a la emergencia, se envió al emplazamiento a personal de la TEPCO, de contratistas y de otras centrales nucleares japonesas (no explotadas por la TEPCO) para que prestara asistencia en diversas tareas, como el restablecimiento del suministro de energía eléctrica y del funcionamiento de los instrumentos de monitorización, la inyección de agua de refrigeración en los reactores, la retirada de escombros y la monitorización de los niveles de radiación [8]. También llegó al emplazamiento personal enviado por organizaciones y organismos públicos nacionales tales como la Fuerza de Autodefensa del Japón, la policía y los bomberos. Este personal prestó ayuda en diversas tareas, entre ellas el manejo de los equipos de gran tamaño necesarios para verter o rociar agua en las piscinas de combustible gastado de las Unidades 1, 3 y 4, y la vigilancia aérea con helicópteros de las piscinas de combustible gastado [3, 6, 8].

El terremoto y el tsunami habían provocado la pérdida del suministro de corriente alterna y continua, y una enorme cantidad de escombros. Asimismo, había réplicas y alertas de posibles nuevos tsunamis. Debido a estos factores, así como al aumento de los niveles de radiación y a las explosiones de hidrógeno, y también a la falta de disposiciones detalladas, la respuesta fue extremadamente difícil y muchas medidas de mitigación no se pudieron aplicar en el momento debido [8]. Los trabajadores presentes en el emplazamiento aplicaron las medidas de mitigación en condiciones muy difíciles, trabajando durante más horas y en circunstancias mucho más agotadoras que lo normal [8].

El Gobierno nacional participó en la adopción de decisiones sobre las medidas de mitigación, como la inyección de agua de mar para enfriar el combustible [6, 7]. Las funciones, las responsabilidades y las atribuciones a ese respecto no se habían asignado con claridad en la fase de preparación.

3.1.3. Gestión de la emergencia

En la época del accidente, el sistema nacional de preparación y respuesta en situaciones de emergencia disponía que las entidades centrales encargadas de la gestión de la emergencia nuclear serían el Cuartel General de Respuesta a la Emergencia Nuclear (CGREN)⁶⁷ y su secretaría⁶⁸, así como el Cuartel General Local de Respuesta a la Emergencia Nuclear (CGREN Local)⁶⁹. El CGREN se encargaría de la dirección y la coordinación de la respuesta nacional, lo que abarcaría la preparación y la emisión de órdenes y/o recomendaciones sobre la evacuación a la administración local [19].

Para la respuesta nacional en el plano local, la gestión general de la respuesta a una emergencia nuclear comenzaría a ser coordinada lo antes posible por el CGREN Local situado en el Centro Externo, a 5 km de la central nuclear de Fukushima Daiichi. El Cuartel General de Respuesta a la Emergencia Nuclear de la Prefectura y el Consejo Conjunto de Respuesta a la Emergencia Nuclear (CCREN) también debían establecerse en el Centro Externo [73, 74, 78].

Para la respuesta de la prefectura a una emergencia nuclear, estaba previsto que el Cuartel General de Respuesta a la Emergencia Nuclear de la Prefectura y el Cuartel General para el Control de Desastres de la prefectura de Fukushima coordinasen las actividades a ese nivel. El CCREN coordinaría la respuesta nacional a escala local con la respuesta a nivel de la prefectura [19, 73, 74].

⁶⁷ El CGREN estaría integrado por las personas que nombrara el Primer Ministro de entre los funcionarios de la secretaría del Gabinete y los órganos administrativos designados [19]. El Primer Ministro desempeñaría la función de Director General del CGREN, que según los planes se ubicaría en la Oficina del Gabinete, de la Oficina del Primer Ministro (véase la figura 3.2).

⁶⁸ La secretaría estaría integrada por representantes de las organizaciones clave y estaría encabezada por el Director General del Organismo de Seguridad Nuclear e Industrial (OSNI), que formaba parte del Ministerio de Economía, Comercio e Industria (MECI). Según los planes, estaría situada en el centro de respuesta a la emergencia del MECI/OSNI, en el edificio del MECI (véase la figura 3.2).

⁶⁹ El CGREN Local estaría integrado por personas procedentes de todas las organizaciones pertinentes, y el Viceministro Superior del MECI sería su Director General. Estaba previsto que operara en el Centro Externo (véase la figura 3.2).

Había disposiciones separadas para responder a las emergencias nucleares y a los desastres naturales en los planos nacional y local. Estas disposiciones no preveían la necesidad de responder a una emergencia nuclear y un desastre natural que se produjeran simultáneamente [74, 78].

En la figura 3.2 se muestra la ubicación de las entidades centrales que gestionarían la respuesta a una emergencia nuclear, según lo planificado antes del accidente.

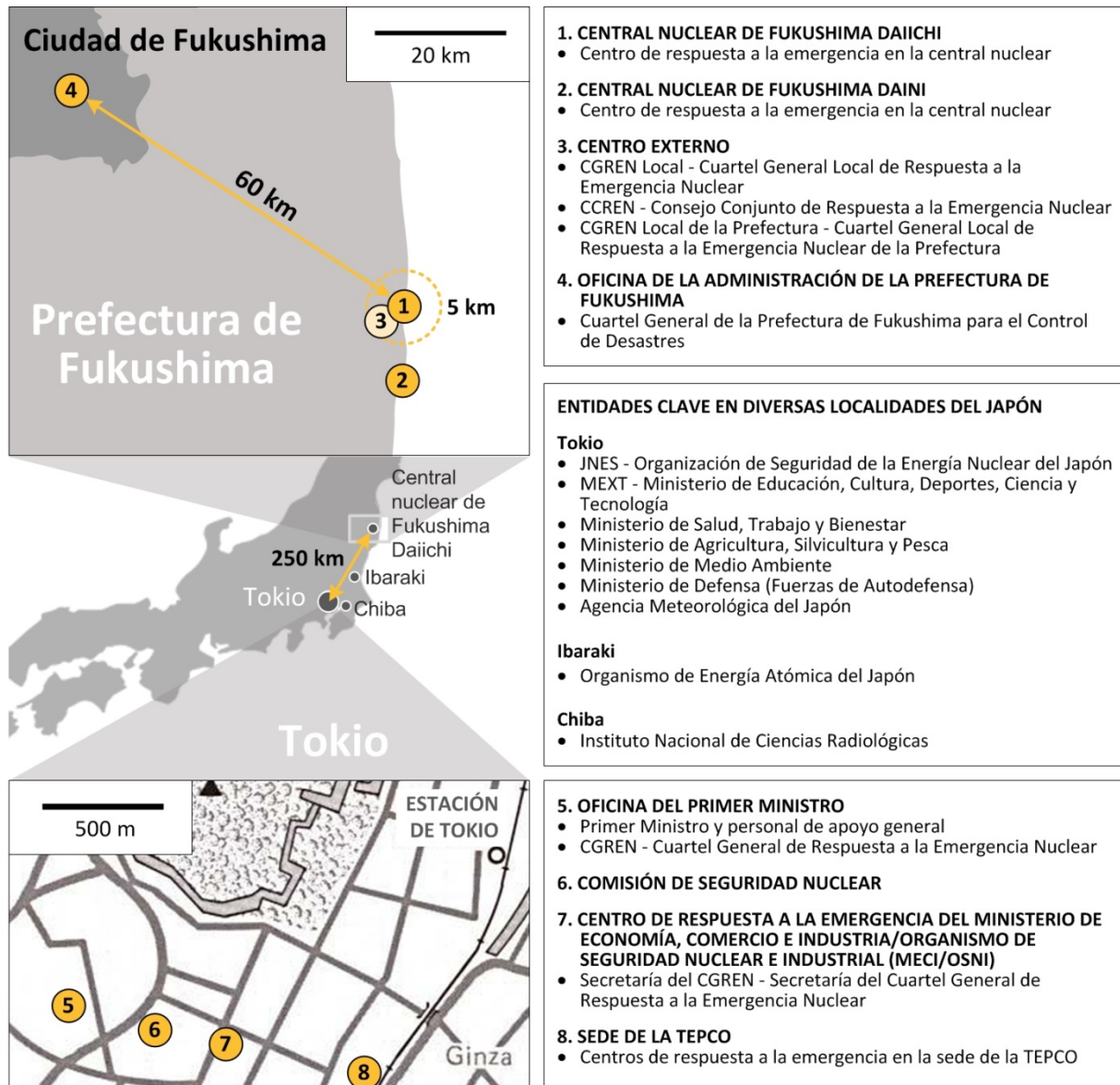


Fig. 3.2. Ubicación de las entidades básicas que intervendrían en la gestión de la respuesta a una emergencia nuclear⁷⁰.

A las 14.50 horas del 11 de marzo de 2011, el Secretario Jefe Adjunto del Gabinete de Gestión de Crisis estableció en la Oficina del Primer Ministro una Oficina de Respuesta a la Emergencia para que se ocupara del terremoto. A las 15.14 horas, el Gobierno nacional estableció un Cuartel General de Respuesta a la Emergencia en la Oficina del Primer Ministro en Tokio, y el Primer Ministro asumió las funciones de Director General de esta entidad. A las 16.36 horas, el Secretario Jefe Adjunto del Gabinete de Gestión de Crisis estableció en la Oficina del Primer Ministro una Oficina de Respuesta a la Emergencia para que se ocupara del accidente nuclear [6].

⁷⁰ Sobre la base de las referencias [7, 8, 73, 74, 79 a 91].

A las 19.03 horas del 11 de marzo de 2011, el Gobierno nacional estableció el Cuartel General de Respuesta a la Emergencia Nuclear, en el mismo momento en que se emitía la declaración de emergencia nuclear [3].

Dada la gran rapidez con que evolucionaba el accidente, no hubo tiempo para deliberaciones pormenorizadas en las reuniones del CGREN. El Primer Ministro y algunos altos funcionarios, situados en la Oficina del Primer Ministro, pasaron a constituir el grupo central de respuesta a la emergencia. El Primer Ministro emitió órdenes de evacuación a las administraciones locales sin intervención de la secretaría del CGREN [7].

El 15 de marzo de 2011 se estableció en la sede de la TEPCO en Tokio una Oficina de Respuesta Integrada Gobierno–TEPCO (un cuartel general integrado de la entidad explotadora y la organización de respuesta gubernamental) [6], para asegurar el intercambio oportuno de información a escala nacional.

A nivel local, los cuantiosos daños provocados por el terremoto y el tsunami dificultaron el inicio de las operaciones en el Centro Externo [92], por lo cual el CGREN Local y otras entidades que deberían haber operado desde ese Centro (el CCREN y el Cuartel General de Respuesta a la Emergencia Nuclear de la Prefectura) no pudieron cumplir sus funciones. El 15 de marzo de 2011, debido al empeoramiento de las condiciones radiológicas, fue necesario evacuar el Centro Externo⁷¹ y trasladar las operaciones al Auditorio de la prefectura de Fukushima, situado a unos 60 km de la central nuclear de Fukushima Daiichi [6, 92]. Esta instalación carecía de medios equivalentes a los del Centro Externo, lo que creó dificultades, por ejemplo para el intercambio de información en tiempo real entre las autoridades pertinentes.

En lo que respecta a la respuesta de la prefectura, se formó una nueva ‘brigada nuclear’⁷² en el Cuartel Cuartel General para el Control de Desastres de la prefectura de Fukushima, en el marco de la estructura establecida para responder al terremoto y el tsunami, a fin de que coordinara las actividades a nivel de la prefectura [7].

3.2. PROTECCIÓN DE LOS TRABAJADORES DE EMERGENCIAS

En la época del accidente, la legislación y las orientaciones nacionales del Japón se referían a las medidas que había que adoptar para proteger a los trabajadores de emergencias⁷³, pero solo en términos generales y sin suficientes detalles.

Se precisaron muchos trabajadores de emergencias, con diferentes profesiones, para prestar apoyo en la respuesta a la emergencia. Llegaron trabajadores de emergencias de diversas organizaciones y servicios públicos. Sin embargo, no había disposiciones para integrar en la respuesta a los trabajadores de emergencias que no habían sido designados antes del accidente.

⁷¹ El Centro Externo no se había diseñado para soportar el aumento de los niveles de radiación.

⁷² La nueva brigada nuclear se formó porque las nueve brigadas funcionales existentes conforme a lo especificado en el Plan de Gestión de Desastres de la prefectura de Fukushima [74] estaban trabajando en la respuesta al terremoto y el tsunami [7].

⁷³ El OIEA utiliza la expresión ‘trabajadores de emergencias’ para referirse a las personas que desempeñan tareas específicas en calidad de trabajador (toda persona que trabaja, ya sea en jornada completa o parcial o temporalmente, por cuenta de un empleador y que tiene derechos y deberes reconocidos en lo que atañe a la protección radiológica ocupacional) en respuesta a una emergencia, incluidos los trabajadores empleados, directa o indirectamente, por los titulares registrados y los titulares de licencias, así como el personal de organizaciones de respuesta tales como los agentes de policía, los bomberos, el personal médico y los conductores y el personal de los vehículos de evacuación. En el Japón se utiliza la expresión ‘personal de preparación para emergencias’ para referirse a todas las personas que realizan actividades de respuesta en situaciones de emergencia nuclear tales como “la comunicación de información pública y de instrucciones a los residentes en las inmediaciones, la orientación a los residentes en las inmediaciones en lo que se refiere a la evacuación, el control del tránsito, la monitorización radiológica y la provisión de tratamiento médico, y la aplicación de medidas para evitar que la situación en una instalación nuclear se transforme en un desastre, así como las que realizan actividades de recuperación en caso de desastre tales como la retirada de contaminantes radiactivos” [93].

La aplicación de las disposiciones para asegurar la protección de los trabajadores contra la exposición a la radiación se vio gravemente afectada por las condiciones extremas imperantes en el emplazamiento. Para mantener un nivel aceptable de protección de los trabajadores de emergencias en el emplazamiento, se aplicaron una serie de medidas improvisadas. El límite de dosis de los trabajadores de emergencias que estaban realizando determinadas tareas se elevó temporalmente para que pudiera proseguir la aplicación de las medidas de mitigación necesarias. El manejo médico de los trabajadores de emergencias también se vio gravemente afectado, y hubo que realizar grandes esfuerzos para atender las necesidades de esos trabajadores en el emplazamiento.

Para la respuesta de emergencia fuera del emplazamiento se contó con la asistencia voluntaria de miembros de la población, los denominados ‘ayudantes’. Las autoridades nacionales publicaron orientaciones sobre el tipo de actividades que podían llevar a cabo los ayudantes y sobre las medidas que había que adoptar para protegerlos.

3.2.1. Protección del personal de la central después del terremoto y el tsunami

Después de la alerta de tsunami se desplegaron esfuerzos para proteger al personal de la central (alrededor de 6000 personas) frente al impacto previsto del tsunami. Se difundieron alertas de tsunami a través del sistema de megafonía del emplazamiento, y se indicó al personal que evacuara la planta y se trasladara a los lugares designados en niveles más elevados. En la mayoría de los casos esto dio resultado, pero no todos los miembros del personal recibieron la alerta de tsunami y las órdenes de evacuación [7, 8]. Dos trabajadores que se encontraban en la planta subterránea del edificio de las turbinas de la Unidad 4 comprobando el equipo después del terremoto se ahogaron como consecuencia de la inundación provocada por el tsunami [8].

La protección del personal de la central frente a los efectos del tsunami fue eficaz en gran medida gracias a las enseñanzas extraídas de la experiencia en la central nuclear de Kashiwazaki-Kariwa cuando se produjo el terremoto de Niigata-Chuetsu-Oki, en 2007, y a la labor realizada posteriormente para establecer procedimientos de salida de emergencia [8].

Entre el 11 y el 14 de marzo de 2011 se evacuó del emplazamiento al personal de la central que no se consideraba esencial, incluidas las mujeres y la mayoría de los empleados de los subcontratistas. En la mañana del 15 de marzo, ante el empeoramiento de las condiciones en el emplazamiento, se evacuó a más personal de la central. Se estima que permanecieron en el emplazamiento entre 50 y 70 miembros del personal, mientras que unas 650 personas fueron evacuadas temporalmente a la central nuclear de Fukushima Daini en autobuses o vehículos privados. A partir del mediodía del mismo día esas personas empezaron a regresar a la central de Fukushima Daiichi [8].

3.2.2. Medidas de protección de los trabajadores de emergencias

En la época del accidente, la legislación y las orientaciones nacionales del Japón mencionaban las medidas que había que adoptar para proteger a los trabajadores de emergencias. Sin embargo, las disposiciones en vigor, tales como el plan del emplazamiento, solo se referían a esos requisitos de forma general, sin suficientes detalles. Por ejemplo, el plan del emplazamiento abarcaba lo siguiente: la definición de responsabilidades; la asignación de tareas genéricas para la preparación y respuesta en situaciones de emergencia; y la preparación de un inventario de los instrumentos disponibles (como los detectores de radiación y los dosímetros electrónicos) [75].

Los límites de dosis de los trabajadores de emergencias estaban fijados en función de las tareas que deberían desempeñar, con un límite superior de dosis de 100 mSv para las medidas encaminadas a salvar vidas y las actividades dirigidas a impedir una catástrofe, y se exigían esfuerzos para reducir al mínimo la exposición [93, 94].

Durante el accidente se adoptaron una serie de medidas improvisadas para mantener un nivel aceptable de protección de los trabajadores de emergencias en las condiciones extremas imperantes en el emplazamiento. Faltaban dosímetros personales, porque la mayoría de los que había en el emplazamiento habían quedado inutilizados a causa del tsunami. Ello creó la necesidad de adoptar medidas de contingencia para el seguimiento de las dosis individuales recibidas por los trabajadores de emergencias presentes en el emplazamiento [8]. Por ejemplo, se dio la instrucción de que los grupos de trabajadores de emergencias que previsiblemente fueran a trabajar en condiciones similares utilizaran un único dosímetro electrónico personal. En el caso de los trabajadores de emergencias situados en el edificio sísmicamente aislado, las dosis se midieron y controlaron monitorizando las tasas de dosis por zona y teniendo en cuenta el tiempo pasado por los trabajadores en cada zona. Esta situación persistió hasta el final de marzo de 2011; para entonces se habían recibido suficientes dosímetros de otras centrales nucleares [6, 8].

El 14 de marzo de 2011, el límite de dosis para los trabajadores de emergencias encargados de ciertos trabajos de emergencia se elevó temporalmente a 250 mSv, a fin de que pudieran continuar las actividades necesarias en el emplazamiento y en un radio de 30 km alrededor de la central nuclear de Fukushima Daiichi [95]. Para los trabajadores de emergencias de los servicios de bomberos que realizaran actuaciones encaminadas a salvar vidas se mantuvo el límite de dosis de 100 mSv [6]. El aumento temporal del límite de dosis a 250 mSv se retiró el 1 de noviembre de 2011 para los trabajadores de emergencias del emplazamiento que empezaban a trabajar en esa fecha; el 16 de diciembre de 2011 se retiró para la mayoría de los trabajadores de emergencias restantes; y el 30 de abril de 2012 se retiró para un pequeño grupo de trabajadores de emergencias con conocimientos y experiencia especializados [96, 97].

La mayoría de los trabajadores de emergencias del emplazamiento recibieron dosis inferiores a 250 mSv [8]. Seis de ellos recibieron dosis superiores al criterio de dosis de 250 mSv, siendo la dosis más alta de 678 mSv (de los cuales 590 mSv se debieron a contaminación interna).

La contaminación interna se atribuyó a las difíciles condiciones de trabajo y a la aplicación inadecuada de las medidas protectoras (por ejemplo, al uso inapropiado de los respiradores y de las medidas de bloqueo de la tiroides con yodo, y a medidas que provocaron la ingestión involuntaria de radionucleidos), principalmente por falta de capacitación, o por la ineficacia de esta [5].

La TEPCO tuvo problemas asimismo para satisfacer debidamente las necesidades de los trabajadores de emergencias en el emplazamiento, por ejemplo, para facilitarles instalaciones y condiciones adecuadas (para el descanso, el sueño, la alimentación, el saneamiento, etc.) [98 a 101].

Durante la respuesta al accidente, personas de las zonas afectadas, así como de todo el Japón, incluidas varias organizaciones no gubernamentales, los denominados ‘ayudantes’, proporcionaron asistencia voluntaria en actividades tales como el suministro de alimentos, agua y productos de primera necesidad, y posteriormente en actividades de descontaminación y monitorización. Las autoridades nacionales publicaron orientaciones sobre el tipo de actividades que podían llevar a cabo los ayudantes y sobre las medidas que había que adoptar para protegerlos [102 a 104].

3.2.3. Designación de los trabajadores de emergencias

Para apoyar la respuesta de emergencia dentro y fuera del emplazamiento se precisaron muchos tipos distintos de trabajadores de emergencias. En las labores de emergencia dentro del emplazamiento trabajó personal de la central nuclear, ya sea empleado directamente por la TEPCO o subcontratado, así como personal de la Fuerza de Autodefensa del Japón, los servicios de bomberos y la policía [8]. En los trabajos de emergencia fuera del emplazamiento participó personal de diferentes organizaciones y servicios (gubernamentales y no gubernamentales). Sus tareas incluyeron evacuar a la población y algunas instalaciones especiales, prestar apoyo a los evacuados, proporcionar atención médica y realizar monitorizaciones y tomas de muestras [6, 97, 105, 106].

No todos los trabajadores de emergencias habían sido designados como tales antes del accidente (por ejemplo, algunos empleados de la TEPCO y de subcontratistas), y no había disposiciones para integrarlos en la respuesta después de su designación. Además, muchos de los que no habían sido designados antes de la emergencia no habían recibido formación para trabajar en las condiciones de una emergencia nuclear. Por ejemplo, no tenían capacitación en los diversos aspectos de la protección radiológica, y no habían sido informados de los riesgos para la salud que podía entrañar la exposición a la radiación, ni entrenados en el uso de los respiradores o en el manejo de pacientes posiblemente contaminados con material radiactivo [107]. Ello causó algunos retrasos en la aplicación de las medidas de mitigación en la primera fase de la respuesta [6].

3.2.4. Manejo médico de los trabajadores de emergencias

La obtención del tratamiento médico necesario para los trabajadores de emergencias con lesiones convencionales resultó problemática, porque varios hospitales habían cerrado como consecuencia de la evacuación o de la necesidad de permanecer en espacios interiores, y algunos no estaban preparados para atender a pacientes posiblemente contaminados con material radiactivo [107, 108]. Hasta que se pudo proporcionar atención médica primaria en el emplazamiento, los trabajadores de emergencias con lesiones convencionales fueron transportados a uno de los dos hospitales locales que estaban funcionando para recibir tratamiento [108].

Unas 17 horas después del terremoto, el Instituto Nacional de Ciencias Radiológicas destacó al CGREN Local (en el Centro Externo) a un equipo de asistencia médica en emergencias radiológicas, integrado inicialmente por un médico, un enfermero y un físico sanitario, para que efectuara evaluaciones de la contaminación y descontaminación de los trabajadores de emergencias [107].

Ocho días después del inicio del accidente, médicos especialistas en salud ocupacional empezaron a proporcionar atención primaria a los trabajadores de emergencias del emplazamiento en el centro de respuesta a la emergencia situado en el edificio sísmicamente aislado. Posteriormente se establecieron dos centros de triaje, uno en el emplazamiento y otro en la ‘Aldea-J’⁷⁴ [3, 8, 108].

El 1 de julio de 2011 se estableció una instalación de atención de emergencia en la central nuclear de Fukushima Daiichi. Para esta instalación se contrató en todo el Japón a personal médico formado en el manejo de emergencias radiológicas [8, 108].

3.3. PROTECCIÓN DE LA POBLACIÓN

Según las disposiciones nacionales para situaciones de emergencia vigentes en la época del accidente, las decisiones relativas a las medidas protectoras se basarían en estimaciones de la dosis proyectada que recibiría la población, que se calcularían cuando fuera necesario adoptar una decisión sirviéndose de un modelo de proyección de dosis, el Sistema de Predicción de Información sobre Dosis Ambientales en Emergencias (SPEEDI). Las disposiciones no preveían que las decisiones sobre las medidas protectoras urgentes para salvaguardar a la población se basaran en la existencia de condiciones específicas predefinidas en la central. Sin embargo, en la respuesta al accidente, las decisiones iniciales relativas a las medidas protectoras se adoptaron sobre la base de las condiciones imperantes en la central. La pérdida del suministro eléctrico en el emplazamiento impidió la introducción de las estimaciones del término fuente en el sistema SPEEDI.

⁷⁴ La Aldea-J está situada a unos 20 km al sur de la central nuclear de Fukushima Daiichi, y antes del accidente era un centro para entrenamientos de fútbol. Después del accidente se utilizó como base para el apoyo logístico general, por ejemplo, para preparar a los trabajadores para las tareas asignadas, monitorizarlos y descontaminarlos, de ser necesario, después de que hubieran ultimado las tareas asignadas, realizar el triaje, etc. [3].

Las disposiciones vigentes antes del accidente incluían criterios para la emisión de la orden de permanecer en espacios interiores, la evacuación y el bloqueo de la tiroides con yodo expresados en términos de dosis proyectadas, pero no de cantidades mensurables. No había criterios para la reubicación de la población.

Las medidas adoptadas para proteger a la población durante el accidente incluyeron la evacuación, la orden de permanecer en espacios interiores, el bloqueo de la tiroides con yodo (mediante la administración de yodo estable), la imposición de restricciones al consumo de alimentos y agua potable, la reubicación y el suministro de información.

La evacuación de la población de las inmediaciones de la central nuclear de Fukushima Daiichi comenzó al final de la tarde del 11 de marzo de 2011, ampliándose progresivamente la zona de evacuación de un radio de 2 km alrededor de la central a 3 km y luego a 10 km. Al atardecer del 12 de marzo, el radio se había aumentado a 20 km. Del mismo modo, la zona en que se ordenó a la población que permaneciera en espacios interiores pasó gradualmente de los 3 a 10 km de distancia de la central fijados poco después del accidente al radio de 20 a 30 km establecido el 15 de marzo. En la zona comprendida dentro del radio de 20 a 30 km de la central rigió la orden de permanecer en espacios interiores hasta el 25 de marzo, cuando el Gobierno nacional recomendó la evacuación voluntaria. La administración de yodo estable para bloquear la tiroides no se aplicó de manera uniforme, principalmente por falta de disposiciones pormenorizadas.

Hubo dificultades para realizar la evacuación, debido a los daños causados por el terremoto y el tsunami y a los problemas de comunicación y transporte consiguientes. También hubo grandes dificultades para evacuar a los pacientes de los hospitales y las residencias de ancianos situados dentro de la zona de evacuación de 20 km.

El 22 de abril, la zona de evacuación de 20 km fue clasificada como ‘Zona de Acceso Restringido’, con control del reingreso. Asimismo, fuera de la ‘Zona de Acceso Restringido’ se estableció una ‘Zona de Evacuación Deliberada’ en los lugares donde podían superarse los criterios de dosis específicos para la reubicación de la población.

Cuando se detectaron radionucleidos en el medio ambiente, se adoptaron disposiciones para proteger la agricultura en la zona agrícola e imponer restricciones al consumo y la distribución de alimentos y al consumo de agua potable. Además, se estableció un sistema de certificación de alimentos y de otros productos destinados a la exportación.

Para mantener informada a la población y responder a sus inquietudes durante la emergencia se utilizaron varios canales, como la televisión, la radio, Internet y líneas telefónicas directas. La retroinformación aportada por la población a través de las líneas telefónicas directas y los servicios de asesoramiento indicó la necesidad de proporcionar información y material de apoyo de fácil comprensión.

3.3.1. Medidas protectoras urgentes y reubicación de la población

Antes del accidente, se habían establecido alrededor de los emplazamientos de las centrales de Fukushima Daiichi y Fukushima Daini zonas de planificación de emergencias de 10 km de radio, en que debía aumentarse significativamente la preparación para emergencias (figura 3.3). Había planes para aplicar medidas protectoras dentro de esas zonas [74].

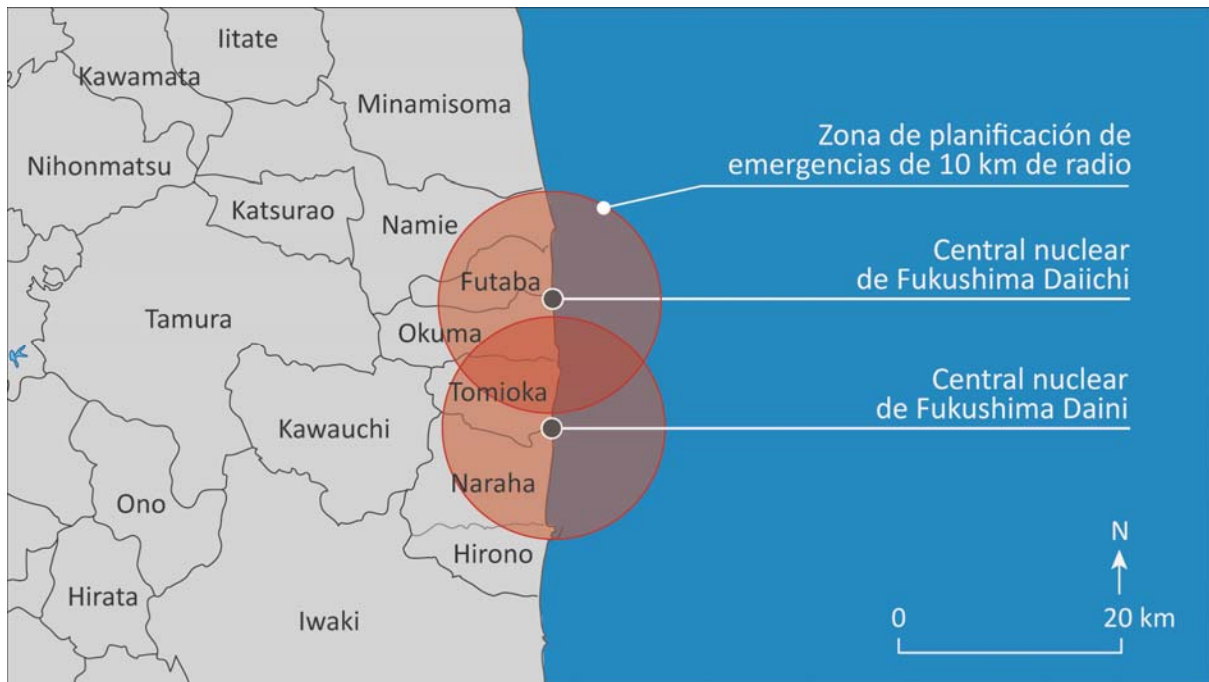


Fig. 3.3. Zonas de planificación de emergencias en torno a las centrales nucleares de Fukushima Daiichi y Fukushima Daini establecidas antes del accidente (sobre la base de la referencia [74]).

Los planes de respuesta a emergencias preveían que las decisiones relativas a las medidas protectoras se basaran en las proyecciones de dosis realizadas en el momento en que fuera necesario adoptar una decisión. Las dosis se proyectarían mediante el sistema SPEEDI después del inicio de un accidente y se compararían con criterios de dosis predeterminados para decidir qué medidas protectoras se requerían y dónde [73, 93]. Este enfoque no era acorde con las normas de seguridad del OIEA, según las cuales las decisiones iniciales sobre las medidas protectoras urgentes para salvaguardar a la población debían basarse en las condiciones de la central [68, 69].

Había criterios de dosis predeterminados para la orden de permanecer en espacios interiores⁷⁵, la evacuación⁷⁶ y el bloqueo de la tiroides con yodo⁷⁷, expresados en términos de dosis proyectadas, pero pero no de cantidades mensurables. No había criterios predeterminados (es decir, genéricos, expresados como dosis, u operacionales, expresados como cantidades mensurables) para la reubicación de la población⁷⁸ [93].

Durante la respuesta al accidente, la pérdida del suministro eléctrico en el emplazamiento impidió la introducción en el sistema SPEEDI⁷⁹ de las estimaciones del ‘término fuente’ proporcionadas por el Sistema de Apoyo a la Respuesta a Emergencias (SARE). Las decisiones relativas a la evacuación y a

⁷⁵ La orden de ‘permanecer en espacios interiores’ se refiere al uso por un período breve de una estructura para protegerse de un penacho aerotransportado y/o de material radiactivo depositado [48].

⁷⁶ ‘Evacuación’ es el abandono rápido y temporal de una zona para evitar o reducir la exposición a la radiación a corto plazo en una emergencia. La evacuación se puede llevar a cabo como medida precautoria sobre la base de las condiciones imperantes en la central [48].

⁷⁷ El ‘bloqueo de la tiroides con yodo’ es una medida protectora urgente que debe adoptarse en toda emergencia en que haya emisión de yodo radiactivo. El bloqueo de la tiroides con yodo entraña la administración de un compuesto de yodo estable (por lo general yoduro potásico) para prevenir o reducir la captación de isótopos radiactivos del yodo por la glándula tiroides [48].

⁷⁸ ‘Reubicación’ es el traslado no urgente de la población a otra zona para evitar la exposición a más largo plazo (por ejemplo, un año) a material radiactivo depositado [48].

⁷⁹ Algunas proyecciones de las dosis se efectuaron utilizando otros supuestos; sin embargo, estas proyecciones no se emplearon como base para la adopción de medidas protectoras urgentes [4, 7].

la orden de permanecer en espacios interiores se adoptaron sobre la base de las condiciones imperantes en la central (es decir, la pérdida de refrigeración del núcleo) y no de las proyecciones de dosis, como estaba planificado [3, 7].

Las decisiones del Gobierno nacional y de las administraciones locales con respecto a las medidas protectoras no estuvieron siempre coordinadas, principalmente debido a los graves problemas de comunicación y en parte también a las dificultades con que se tropezó para activar el Centro Externo [92]. A las 20.50 horas del 11 de marzo de 2011, la prefectura de Fukushima emitió una orden de evacuación para los residentes en un radio de 2 km alrededor de la central nuclear de Fukushima Daiichi, sobre la base de la información recibida directamente de la TEPCO [3, 6, 7, 70].

A las 21.23 horas, el Gobierno nacional emitió una orden de evacuación de la zona comprendida en un radio de 3 km alrededor de la central, y la orden de permanecer en espacios interiores en la zona comprendida en un radio de 3 a 10 km. A las 5.44 horas del 12 de marzo de 2011, el Gobierno nacional emitió una orden de evacuación de la zona correspondiente a un radio de 3 a 10 km alrededor de la central, y a las 18.25 horas amplió esa orden a un radio de 20 km⁸⁰ [3, 7].

La comunicación de las órdenes de evacuación a la población se llevó a cabo mediante la red local de comunicación por radio para la gestión de desastres, vehículos con altavoces, vehículos de la policía y visitas de puerta a puerta. Debido a las condiciones imperantes en la central, a los problemas de coordinación y a la insuficiente planificación previa, las órdenes de evacuación y de permanecer en espacios interiores fueron modificadas varias veces en el plazo de 24 horas, ordenándose finalmente la evacuación de una zona de un radio de 20 km, lo que afectó a unas 78 000 personas [7].

La evacuación fue dificultosa a causa de los daños infraestructurales y los problemas de comunicación y transporte provocados por el terremoto y el tsunami. También se tropezó con grandes dificultades para evacuar a los pacientes de los hospitales y las residencias de ancianos situados en la zona de evacuación de 20 km de radio (por ejemplo, para proporcionarles medios de transporte apropiados y albergues que contasen con suministros médicos). Pese a los daños sufridos por las carreteras y los embotellamientos del tráfico, la mayoría de los residentes que no precisaban apoyo médico empezaron a abandonar la zona de evacuación a las pocas horas de la emisión de las órdenes de evacuación [7].

La orden de permanecer en espacios interiores para los residentes en la zona comprendida en un radio de 20 a 30 km alrededor de la central nuclear de Fukushima Daiichi se dio el 15 de marzo y se mantuvo hasta el 25 de marzo [3, 7]. El prolongado período sin salir al exterior y el desmoronamiento de la infraestructura local perturbó gravemente la vida de la población [7]. El 25 de marzo de 2011, el Gobierno nacional emitió una recomendación de evacuación voluntaria para los residentes en la zona de 20 a 30 km [3, 7], pero muchos de ellos ya la habían abandonado voluntariamente.

La administración de yodo estable para bloquear la tiroides no se aplicó de manera uniforme, principalmente a causa de la insuficiente planificación previa. Algunas administraciones locales distribuyeron comprimidos de yodo estable pero no aconsejaron que se tomaran, mientras que otras distribuyeron los comprimidos y aconsejaron a la población que los tomara, y otras aún esperaron a recibir instrucciones del Gobierno nacional [6].

⁸⁰ Respecto de la central nuclear de Fukushima Daiichi, a las 7.45 horas del 12 de marzo de 2011 se emitió una orden de evacuación de los habitantes en un radio de 3 km y la orden de permanecer en espacios interiores para la zona situada en un radio de 3 a 10 km alrededor de la central [6]. Después de la explosión de hidrógeno registrada en la Unidad 1 de la central nuclear de Fukushima Daiichi (a las 15.36 horas del 12 marzo), a las 17.39 horas del 12 de marzo se adoptó la decisión de evacuar a los habitantes en un radio de 10 km alrededor de la central nuclear de Fukushima Daiichi, a modo de precaución por si se producía en esta central una explosión de hidrógeno similar [6]. Dado que esa zona de evacuación de 10 km a la redonda se encontraba dentro de la zona de evacuación de 20 km en torno a la central nuclear de Fukushima Daiichi, no fue necesario aplicar más medidas protectoras respecto de la central nuclear de Fukushima Daiichi.

Algunos residentes regresaron a sus hogares situados en las zonas evacuadas para recoger pertenencias antes de que, a finales de marzo de 2011, se estableciera el pleno control del acceso [6]. El 22 de abril, tras celebrar consultas con las administraciones locales, la zona de evacuación de 20 km existente alrededor de la central nuclear de Fukushima Daiichi se clasificó como ‘Zona de Acceso Restringido’, con control del reingreso y condiciones para el acceso temporal. En mayo de 2011 se otorgó acceso temporal por un período breve, tras haberse adoptado algunas disposiciones, entre ellas la comunicación de instrucciones específicas y la monitorización de la contaminación [6, 104, 109].

La monitorización de los evacuados a escala local empezó el 12 de marzo de 2011. Las decisiones relativas a la necesidad de descontaminación se basaron en criterios operacionales establecidos antes del accidente. Al cabo de varios días, los criterios se elevaron teniendo en cuenta las condiciones imperantes (como las bajas temperaturas y el insuficiente abastecimiento de agua) [5].

La monitorización del medio ambiente después del accidente se llevó a cabo en condiciones difíciles y peligrosas, y con poco equipo y personal. Por ejemplo, el terremoto y el tsunami habían inutilizado la mayor parte del equipo de monitorización local existente. La monitorización en un radio de 20 km alrededor de la central nuclear de Fukushima Daiichi comenzó el 12 de marzo y finalizó el 14 de marzo, cuando se había completado la evacuación de esa zona. En algunos lugares situados fuera de la zona de evacuación de 20 km, se midieron tasas de dosis del orden de algunos centenares de microsievvert por hora ($\mu\text{Sv/h}$) del 15 de marzo en adelante [3, 6].

El 11 de abril de 2011, el Gobierno nacional anunció que se utilizaría el criterio de una dosis de 20 mSv, como dosis proyectada en un año contado a partir de la fecha del accidente, para determinar las áreas situadas fuera de la zona de evacuación de 20 km de las que pudiera ser necesario sacar a la población y reubicarla⁸¹ [3]. El 22 de abril de 2011 se estableció una ‘Zona de Evacuación Deliberada’ más allá de la zona de evacuación de 20 km para incluir las áreas en que podría superarse ese criterio de dosis proyectada de 20 mSv. El Gobierno nacional emitió la orden de que la reubicación de la población de esa zona se llevara a cabo en el plazo aproximado de un mes [3].

Además de la ‘Zona de Evacuación Deliberada’, el 22 de abril de 2011 se estableció también una ‘Zona Preparada para la Evacuación en Caso de Emergencia’ (véase la figura 3.4). Se aconsejó a los residentes en la ‘Zona Preparada para la Evacuación en Caso de Emergencia’ que permanecieran en espacios interiores o se evacuaran por sus propios medios si volvían a producirse situaciones inquietantes en relación con la central nuclear de Fukushima Daiichi. La designación de ‘Zona Preparada para la Evacuación’ se retiró el 30 de septiembre de 2011 [6].

Como resultado de la monitorización llevada a cabo fuera de la ‘Zona de Acceso Restringido’ (es decir, la zona de evacuación de 20 km) y de la ‘Zona de Evacuación Deliberada’, se identificaron diversos lugares donde las dosis proyectadas que recibirían los residentes en el plazo de un año contado a partir del accidente superarían los 20 mSv. El 16 de junio, el Gobierno nacional anunció una directriz en que se señalaba que esos lugares debían designarse como ‘Puntos Específicos donde se Recomienda la Evacuación’. A partir del 30 de junio, el Gobierno nacional empezó a designar esos lugares de los cuales había que sacar a la población y reubicarla [6, 7].

En la figura 3.4 se indican las zonas y los lugares para los que se ordenaron o recomendaron medidas protectoras hasta el 30 de septiembre de 2011.

⁸¹ En la mayoría de los documentos oficiales japoneses en que se describe la respuesta al accidente de Fukushima Daiichi no se utiliza el término ‘reubicación’, sino solo el de ‘evacuación’, para referirse a los desplazamientos de las personas.

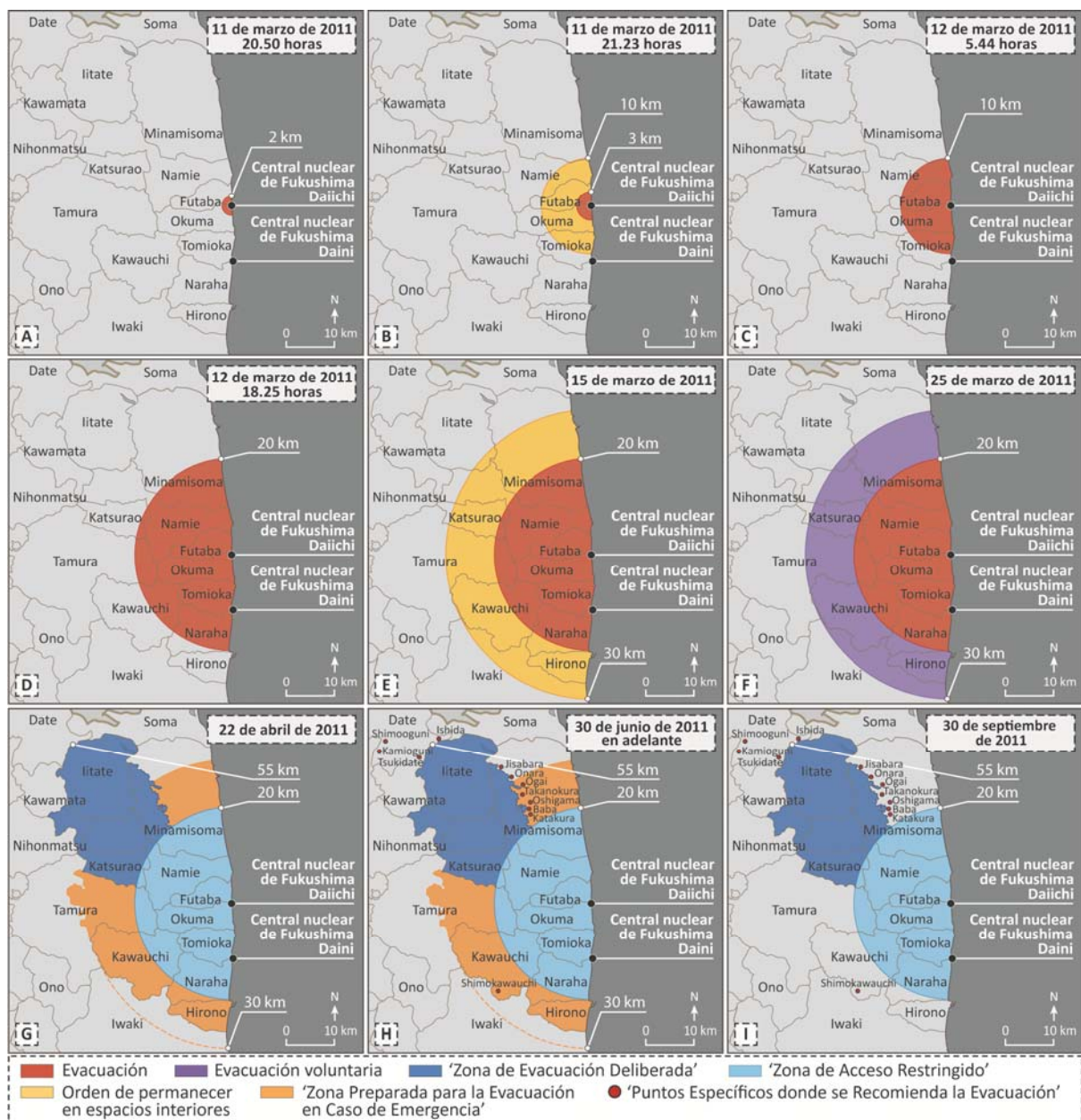


Fig. 3.4. Zonas y lugares para los que se ordenaron o recomendaron medidas protectoras hasta el 30 de septiembre 2011 (sobre la base de las referencias [3, 6, 7, 104]).

Los funcionarios de las administraciones locales tuvieron que decidir asimismo en una fase temprana si se reabrían las escuelas, y en qué condiciones. Inicialmente, el 19 de abril de 2011 se estableció con ese fin un criterio de dosis de 20 mSv/año. El 27 de mayo, en respuesta a la inquietud de la población, el Gobierno del Japón emitió una notificación en que declaraba el objetivo de reducir la dosis a 1 mSv/año a corto plazo [7].

3.3.2. Medidas protectoras relacionadas con los alimentos, el agua potable y la agricultura

Los criterios de concentraciones de actividad de radionucleidos específicos que se habrían de utilizar en caso de emergencia nuclear para imponer restricciones respecto del agua potable y los alimentos producidos en el Japón se habían elaborado antes del accidente [93]. Sin embargo, esos valores no se

habían adoptado como límites reglamentarios específicos para su uso en emergencias⁸² [6, 7]. El 17 de marzo de 2011, esos criterios se establecieron como valores reglamentarios provisionales para los niveles de radionucleidos presentes en los alimentos y el agua potable en virtud de la Ley de Control de Sanidad de los Alimentos [110].

Tras la detección de material radiactivo en el medio ambiente, se adoptaron disposiciones para controlar los alimentos y el agua potable. Las disposiciones consistieron en lo siguiente: 1) el establecimiento, mediante la Ley de Control de Sanidad de los Alimentos, de niveles de concentración de radionucleidos para el cesio radiactivo y el yodo radioactivo presentes en los alimentos y el agua potable como valores reglamentarios provisionales por encima de los cuales se impondrían restricciones al consumo de alimentos y agua potable; y 2) mediciones de las concentraciones de radionucleidos en muestras de alimentos y agua potable. Al cabo de unas pocas semanas, los niveles de yodo radiactivo (¹³¹I) habían descendido significativamente, debido a la brevedad de su período de semidesintegración (alrededor de 8 días), y la imposición de restricciones al consumo de alimentos en un plazo de mediano a largo se basó únicamente en las concentraciones de cesio radiactivo [110].

El 21 de marzo de 2011, el Gobierno nacional comenzó a imponer restricciones a la distribución de determinados alimentos [111], que se fueron modificando a medida que evolucionaba la situación. Las restricciones al consumo de alimentos se formularon sobre la base de los resultados de la monitorización de muestras de alimentos, con los que se determinaron los alimentos que superaban los criterios y se definieron las áreas geográficas afectadas [112, 113].

Hubo que hacer frente a varios retos para poder adoptar medidas protectoras en relación con los alimentos y las bebidas, entre ellos: 1) la definición de criterios (concentraciones de actividad de radionucleidos) que se pudieran utilizar como base para el control de los alimentos; 2) la determinación, en diferentes áreas geográficas, de los alimentos que estuvieran o pudieran estar afectados por niveles superiores a esos criterios; 3) la insuficiencia de la infraestructura y los recursos para tomar muestras y realizar análisis; y 4) las preocupaciones de algunas administraciones locales con respecto a la toma de muestras y la realización de análisis.

El 4 de abril de 2011 se estableció una política que permitía imponer restricciones al consumo de alimentos no solo en las zonas definidas por los límites de las prefecturas sino también en áreas geográficas menores (tales como ciudades, pueblos y aldeas), cuando fuera el caso. La política establecía un procedimiento para imponer, o levantar, restricciones al consumo de diferentes productos alimentarios. Las prefecturas podían solicitar que se modificaran las restricciones, a condición de que tres pruebas semanales consecutivas de monitorización de los alimentos dieran resultados inferiores a los valores reglamentarios provisionales [7].

El 5 de abril de 2011, sobre la base de las concentraciones de ¹³¹I medidas en muestras de pescado, se añadieron los valores reglamentarios provisionales para las concentraciones de actividad del yodo radiactivo en los productos pesqueros [114].

El 8 de abril de 2011 se promulgó una política de imposición de restricciones al cultivo de arroz en suelos agrícolas que presentaran niveles de cesio radiactivo superiores a los criterios establecidos [6].

El 14 de abril de 2011 se establecieron niveles de concentración del cesio radiactivo y el yodo radiactivo en los piensos como valores permisibles provisionales. Pese a las restricciones impuestas a los piensos, algunas muestras de carne de vacuno superaron los valores reglamentarios provisionales (en julio de 2011). Se estableció un régimen de fiscalización para prevenir la distribución de esa carne a los consumidores [6].

⁸² Después del accidente ocurrido en 1986 en la central nuclear de Chernóbil, en la antigua Unión Soviética, se habían establecido criterios (370 Bq/kg de cesio radiactivo — ¹³⁴Cs y ¹³⁷Cs) como límites reglamentarios para los alimentos importados al Japón [7].

El 1 de abril de 2012 entraron en vigor límites normativos que sustituyeron a los valores reglamentarios provisionales. Esos límites especificaban las concentraciones de actividad de los radionucleidos presentes en los alimentos y el agua potable sobre la base de una dosis efectiva de 1 mSv/año (mientras que para los valores reglamentarios provisionales se había utilizado un criterio de base de 5 mSv/año), teniendo en cuenta las contribuciones a la dosis de una variedad de radionucleidos emitidos durante el accidente. En consecuencia, estos valores eran muy inferiores a los valores reglamentarios provisionales que habían regido hasta ese momento [115].

3.3.3. Información pública

Antes del accidente ya se habían establecido disposiciones para informar a la población. A escala nacional había disposiciones que tenían en cuenta la necesidad de que las organizaciones de respuesta pertinentes coordinaran la labor de informar a la población, con inclusión del contenido de la información, los momentos en que se diera a conocer y el método utilizado para los anuncios [73]. El Plan de Gestión de Desastres de la prefectura de Fukushima también contenía disposiciones para la información pública [74].

El órgano regulador, el OSNI, difundió su mensaje inicial sobre las repercusiones del terremoto en las instalaciones nucleares a través de su aplicación para dispositivos móviles ('Mobile NISA') a las 15.16 horas del 11 de marzo de 2011, 30 minutos después del terremoto. A las 19.03 horas, el Primer Ministro emitió la declaración de emergencia nuclear, que fue anunciada en una conferencia de prensa a las 19.45 horas. Posteriormente, a las 21.52 horas, se celebró una conferencia de prensa del Gobierno sobre las órdenes de evacuación [6, 7].

El Gobierno nacional, el OSNI, las organizaciones locales de respuesta a emergencias, las administraciones locales y la TEPCO organizaron conferencias de prensa independientes, que prosiguieron hasta el 25 de abril. El Secretario Jefe del Gabinete dio regularmente dos conferencias de prensa al día, además de las otras que fueron necesarias, para informar a la población sobre el accidente y sobre las opiniones del Gobierno. El OSNI publicó más de 150 comunicados de prensa y dio 182 conferencias de prensa entre el 11 de marzo y el 31 de mayo de 2011 [3]. El MEXT presentó los resultados de la monitorización del medio ambiente en conferencias de prensa y en sesiones de información para la prensa.

La Comisión de Seguridad Nuclear celebró conferencias de prensa a diario desde el 25 de marzo hasta el 24 de abril de 2011, y otras ocho entre el 25 de abril y el 19 de mayo de 2011 [3].

A partir del 25 de abril de 2011 se organizaron conferencias de prensa conjuntas de diversos organismos que estaban participando en la respuesta, lo que aumentó la coherencia de la información proporcionada [6]. El CGREN Local publicó boletines y los distribuyó en los lugares de evacuación a partir de abril de 2011. También se difundió periódicamente información de interés a través de las emisoras de radio locales [3].

Se crearon líneas telefónicas directas para responder a las preguntas de la población. Por ejemplo, el 11 de marzo de 2011, el OSNI creó una línea directa para responder a las preguntas relativas a la evolución de la emergencia y la seguridad radiológica, y entre el 17 de marzo y el 31 de mayo de 2011 recibió alrededor de 15 000 llamadas [3]; el Instituto Nacional de Ciencias Radiológicas abrió una línea telefónica directa el 13 de marzo, y al 11 de abril había respondido a unas 6500 llamadas [116]; el MEXT y el JAEA abrieron una línea directa el 17 de marzo de 2011, y al 18 de mayo de 2011 habían recibido un total de 17 500 llamadas [3]. La prefectura de Fukushima organizó servicios de asesoramiento para responder a las preguntas de los residentes sobre diversos aspectos de la radiación. La retroinformación aportada por la población a través de las líneas telefónicas directas y los servicios de asesoramiento indicó la necesidad de proporcionar información y material de apoyo de fácil comprensión [3].

A partir del 12 de marzo de 2011, el Gobierno nacional publicó información en chino, coreano e inglés en los sitios web de los ministerios y organismos pertinentes [117]. Se proporcionó información al cuerpo diplomático con sede en Tokio en reuniones informativas regulares que el Gobierno nacional celebró a diario desde el 13 de marzo hasta el 18 de mayo de 2011, y tres veces por semana a partir del 19 de mayo [6]. Asimismo, se estableció un canal de notificación por fax y correo electrónico con el cuerpo diplomático. Las misiones diplomáticas del Japón proporcionaron información a sus Estados anfitriones, que la publicaron en sitios web en un total de 29 idiomas [3].

A partir del 13 de marzo de 2011, los ministerios nacionales y organismos gubernamentales competentes celebraron conferencias de prensa conjuntas, en su mayoría a diario, para los medios de comunicación extranjeros [6].

Las dificultades con que se tropezó para proporcionar información a la comunidad internacional tuvieron que ver principalmente con la carga de trabajo que supuso para los recursos humanos la traducción de los materiales y la respuesta a las peticiones de información por teléfono [117].

Tras el accidente de Fukushima Daiichi, el Japón notificó las clasificaciones establecidas según la Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos (INES). La clasificación de la INES se aplicó por separado a las distintas unidades del mismo emplazamiento, y se revisó y elevó varias veces en el primer mes. Las revisiones al alza de la clasificación de la INES provocaron gran inquietud en la población y los medios de comunicación.

3.3.4. Comercio internacional

Se emprendieron muchas actividades y medidas con el fin de: 1) tranquilizar a la población, las industrias y los Estados con respecto a la inocuidad de los productos japoneses; 2) facilitar el comercio internacional de productos japoneses y evitar los retrasos en la distribución; y 3) proporcionar asesoramiento y orientación a las empresas e industrias, en particular en la prefectura de Fukushima [98, 99, 118, 119].

La mayoría de los Estados importadores introdujeron medidas de fiscalización de las mercancías japonesas; muchos aumentaron los controles de importación existentes o comenzaron a exigir un certificado del Gobierno del Japón; y algunos prohibieron la importación de mercancías japonesas o procedentes de determinadas regiones del Japón (principalmente de productos agrícolas) durante un período de tiempo. En junio de 2011, el Japón estableció un sistema de certificación de los productos alimentarios destinados a la exportación, lo que contribuyó a tranquilizar al público y a otras partes interesadas en cuanto a la existencia efectiva de controles. En septiembre de 2011 el sistema se amplió para abarcar los contenedores de transporte y algunos productos industriales destinados a la exportación [120].

3.3.5. Gestión de los desechos en la fase de emergencia

Las disposiciones para la gestión de los desechos radiactivos establecidas en el Japón antes del accidente abarcaban los desechos generados en instalaciones tales como las centrales nucleares, pero no los desechos radiactivos que se hubieran generado en zonas públicas [121]. Después del accidente se elaboraron estrategias, directrices e instrucciones pormenorizadas para la gestión de los desechos radiactivos.

El 3 de junio de 2011, la Comisión de Seguridad Nuclear publicó la ‘Política a corto plazo para garantizar la seguridad en el tratamiento y la disposición final de los desechos contaminados de los alrededores del emplazamiento de la central nuclear de Fukushima Daiichi’ [122]. En este documento se proporcionaban criterios dosimétricos para: los materiales reciclados; la protección de los trabajadores que trataran esos materiales; la protección de los miembros de la población en las inmediaciones de las instalaciones de tratamiento; y la protección de los miembros de la población en las inmediaciones de un

emplazamiento de disposición final. La Comisión de Seguridad Nuclear señaló que la disposición final de los materiales afectados por el accidente —a saber, los escombros, los lodos del tratamiento de aguas y de aguas servidas, las cenizas de incineración, los árboles, las plantas y el suelo resultante de las actividades de descontaminación— se llevaría a cabo aplicando las medidas de gestión adecuadas y que se consideraría la posibilidad de reutilizar algunos de esos materiales. Los productos manufacturados a partir de esos materiales reutilizados se someterían a un control de la contaminación y a un manejo adecuado antes de su introducción en el mercado. Se aplicarían medidas protectoras apropiadas para mantener la exposición a la radiación sufrida por los trabajadores y por la población en los niveles más bajos que fuera razonablemente posible alcanzar [122].

El 26 de agosto de 2011, el CGREN estableció la ‘Política básica de respuesta a la emergencia sobre los trabajos de descontaminación’ [123], como política provisional hasta la plena entrada en vigor de la ‘Ley de Medidas Especiales sobre el Manejo de la Contaminación Ambiental por Materiales Radiactivos Descargados en el Accidente de la Central Nuclear asociado con el Terremoto del Océano Pacífico frente al Distrito de Tohoku del 11 de Marzo de 2011’. La Ley fue aprobada el 26 de agosto de 2011 y promulgada el 30 de agosto de 2011; algunas partes entraron en vigor ese mismo día, pero en su totalidad entró en vigor en enero de 2012 [124]. En ella se describía la gestión de las zonas contaminadas y se asignaban responsabilidades al Gobierno nacional y las administraciones locales, al explotador y a la población. Esta Ley facilitó la transición de la situación de exposición de emergencia a una situación de exposición existente, y formalizó también la gestión a largo plazo de la monitorización del medio ambiente, las medidas de descontaminación y la designación, el tratamiento, el almacenamiento y la disposición final del suelo y los desechos contaminados por material radiactivo.

3.4. TRANSICIÓN DE LA FASE DE EMERGENCIA A LA FASE DE RECUPERACIÓN Y ANÁLISIS DE LA RESPUESTA

Las políticas, directrices, criterios y disposiciones específicos para la transición de la fase de emergencia a la fase de recuperación no se elaboraron hasta después del accidente de Fukushima Daiichi. Al formular esas disposiciones, las autoridades del Japón decidieron aplicar las recomendaciones más recientes de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP).

Se llevaron a cabo análisis del accidente y de la respuesta a la emergencia, que se presentaron como informes, publicados, entre otros, por el Gobierno del Japón, la entidad explotadora (TEPCO) y dos comités de investigación creados por el Gobierno y el Parlamento, respectivamente.⁸³

Después del accidente, muchas de las disposiciones nacionales del Japón para la preparación y respuesta en situaciones de emergencia se revisaron para tener en cuenta las conclusiones de esos análisis y las normas de seguridad del OIEA pertinentes en lo que respecta a la preparación y respuesta en situaciones de emergencia.

3.4.1. Transición de la fase de emergencia a la fase de recuperación

Al elaborar las disposiciones para la transición de la fase de emergencia a la fase de recuperación después del accidente, las autoridades japonesas decidieron aplicar las recomendaciones más recientes de la ICRP [127 a 129]. Las políticas, directrices y criterios específicos, así como las disposiciones generales para la transición de la fase de emergencia a la fase de recuperación, se elaboraron después del accidente [130]. Este proceso incluyó el ajuste de las medidas protectoras y las disposiciones aplicadas en la primera fase de la respuesta a la emergencia y la consideración de la información

⁸³ También publicaron informes el sector académico y el sector privado (por ejemplo, la Sociedad de Energía Atómica del Japón y la Fundación de la Iniciativa para la Reconstrucción del Japón) [125, 126].

disponible sobre las condiciones imperantes en las zonas afectadas (obtenida principalmente mediante una monitorización completa) [131, 132]. También se consideraron las operaciones necesarias para la recuperación a más largo plazo.

Esas medidas y disposiciones tenían principalmente por objeto atender a las necesidades inmediatas surgidas en el proceso de transición. Las disposiciones previstas para la protección de los trabajadores se modificaron gradualmente, en función de las tareas que se llevaban a cabo [6, 96].

El 17 de abril de 2011, la TEPCO publicó una ‘hoja de ruta’ donde se definían los pasos necesarios para la recuperación en el emplazamiento (la política básica, las metas, y medidas inmediatas en lo referente a la refrigeración, la mitigación de las consecuencias y la monitorización y descontaminación) [24].

El 17 de mayo de 2011, el MECI publicó una ‘Hoja de ruta para la prestación de asistencia inmediata a los afectados por el accidente nuclear’ [130]. En ella se enumeraban nueve grupos de medidas, divididas en pasos cuya aplicación se extendería por diferentes períodos y que estaban vinculados con la hoja de ruta de la TEPCO. El paso 1 debía cumplirse a mediados de julio, el paso 2, entre tres y seis meses después de la consecución del paso 1, y el paso 3, en un período a medio plazo. La finalidad de la hoja de ruta era facilitar la comunicación y los preparativos para la transición a las operaciones de recuperación a largo plazo y la reanudación de la actividad social y económica normal. Se asignaban responsabilidades y se especificaban otros aspectos organizativos del proceso de transición, y los objetivos y condiciones para la terminación de la fase de emergencia.

3.4.2. Análisis de la respuesta

Diversos órganos efectuaron análisis del accidente y de la respuesta a la emergencia con el fin de extraer enseñanzas y de mejorar, entre otros aspectos, las disposiciones para la preparación y respuesta en situaciones de emergencia en el Japón. Como resultado de ello, se identificaron varias mejoras posibles en las disposiciones.

Por ejemplo, en el informe del Gobierno del Japón a la Conferencia Ministerial del OIEA celebrada en junio de 2011 [3] se presentaron las enseñanzas extraídas en los siguientes aspectos importantes de la preparación y respuesta ante una emergencia: 1) la posibilidad de emergencias combinadas constituidas por un desastre natural y un accidente nuclear; 2) la monitorización del medio ambiente; 3) la distribución de funciones entre las organizaciones centrales y locales; 4) la comunicación en una emergencia; 5) la respuesta a la asistencia recibida de otros Estados y la comunicación con la comunidad internacional; 6) la modelización de la emisión de materiales radiactivos; y 7) los criterios para la formulación de directrices sobre la evacuación y la protección radiológica en las emergencias nucleares.⁸⁴

El Comité de Investigación sobre el Accidente de las Centrales Nucleares de Fukushima de la Compañía de Energía Eléctrica de Tokio, creado por el Gobierno, concluyó que, en sus directrices nacionales, el Japón debía tener en cuenta las enseñanzas de la comunidad internacional e incluir normas internacionales, como las elaboradas por el OIEA [5].

En el Informe de Análisis del Accidente Nuclear de Fukushima preparado por la TEPCO [8] se destacaron algunos problemas surgidos durante la respuesta a la emergencia, referentes, entre otras cosas, a la organización de la respuesta a la emergencia, la comunicación de información, el transporte de materiales y equipo y la protección radiológica.

En el informe de la Comisión de Investigación Independiente sobre el Accidente Nuclear de Fukushima, creada por la Dieta Nacional del Japón, se recomendó, entre otras cosas, que se reformara el sistema nacional de preparación y respuesta en situaciones de emergencia, aclarando las funciones y responsabilidades del gobierno, la administración local y los explotadores en una emergencia [7].

⁸⁴ En septiembre de 2011 se presentó al OIEA un informe adicional [4] en el que se proporcionaba información sobre los nuevos acontecimientos y sobre los progresos realizados en la aplicación de las enseñanzas señaladas en el primer informe, publicado en junio de 2011.

Sobre la base de estos análisis y de las lecciones aprendidas, se adoptaron medidas correctivas para reforzar las disposiciones de preparación y respuesta en situaciones de emergencia [133, 134]. En el Gabinete se estableció una Comisión de Preparación para Emergencias Nucleares, con el fin de asegurar que el gobierno aplicara y promoviera efectivamente las políticas de respuesta a una emergencia nuclear [134]. La ARN elaboró Directrices para la Respuesta a una Emergencia Nuclear⁸⁵ [136], en que se tenían en cuenta también las normas de seguridad del OIEA en la esfera de la preparación y respuesta en situaciones de emergencia.

3.5. RESPUESTA DENTRO DEL MARCO INTERNACIONAL PARA LA PREPARACIÓN Y RESPUESTA EN SITUACIONES DE EMERGENCIA

*En la época del accidente existía un amplio marco internacional para la preparación y respuesta en situaciones de emergencia, compuesto por instrumentos jurídicos internacionales, normas de seguridad del OIEA y disposiciones operacionales.*⁸⁶

El OIEA tenía entonces cuatro funciones en la respuesta a una emergencia nuclear o radiológica: 1) la notificación y el intercambio de información oficial a través de puntos de contacto designados oficialmente; 2) el suministro de información oportuna, clara y comprensible; 3) la prestación de asistencia internacional y su facilitación, cuando así se solicitara; y 4) la coordinación de la respuesta interinstitucional.

En la respuesta internacional al accidente participaron muchos Estados y varias organizaciones internacionales.

El OIEA permaneció en comunicación con el punto de contacto oficial en el Japón, difundió información sobre la evolución de la emergencia, y mantuvo informados a los Estados, las organizaciones internacionales pertinentes y el público. La comunicación con el punto de contacto oficial en el Japón fue difícil en la primera fase de la respuesta a la emergencia. Con la visita al Japón del Director General del OIEA y el posterior despliegue de oficiales de enlace en Tokio, mejoró la comunicación entre el OIEA y el punto de contacto. El OIEA envió también misiones de expertos al Japón y coordinó la respuesta interinstitucional.

Los distintos Estados⁸⁷ adoptaron o recomendaron medidas protectoras diferentes para sus nacionales que se encontraban en el Japón en respuesta al accidente. En general, las diferencias no se explicaron bien a la población, y en algunos casos ocasionaron confusión e inquietud.

Las organizaciones pertinentes que integran el Comité Interinstitucional sobre Emergencias Radiológicas y Nucleares intercambiaron regularmente información. También se publicaron comunicados de prensa conjuntos.

El OIEA, a través de sus disposiciones de emergencia, mantuvo un enlace directo con el OSNI, que era el punto de contacto oficial en el Japón [143]. El Japón proporcionó información de conformidad con el artículo 3 de la Convención sobre Pronta Notificación.

⁸⁵ Las Directrices para la Respuesta a una Emergencia Nuclear se basaron en el informe provisional acerca de la revisión de la Guía de Reglamentación sobre la Preparación para Emergencias en Instalaciones Nucleares [93], publicado en 2012 [135].

⁸⁶ Los principales instrumentos jurídicos internacionales son la Convención sobre la Pronta Notificación de Accidentes Nucleares y la Convención sobre Asistencia en Caso de Accidente Nuclear o Emergencia Radiológica. En la época del accidente, las normas de seguridad internacionales en la esfera de la preparación y respuesta en situaciones de emergencia eran las de las publicaciones N^o GS-R-2 [69] y GS-G-2.1 [68] de la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA*. La publicación N^o 115 de la *Colección Seguridad* [137] también incluía elementos relacionados con la preparación y respuesta en situaciones de emergencia. Las disposiciones operacionales internacionales abarcaban el Manual sobre operaciones técnicas para la notificación y asistencia en situaciones de emergencia (ENATOM), la Red de Respuesta y Asistencia (RANET) del OIEA y el Plan Conjunto de las Organizaciones Internacionales para la Gestión de Emergencias Radiológicas (Plan Conjunto).

⁸⁷ El Estado es el principal responsable de la preparación y respuesta ante una emergencia nuclear o radiológica, así como de la protección de la vida y la salud humanas, los bienes y el medio ambiente.

La Secretaría del OIEA difundió información sobre la evolución de la emergencia y mantuvo informados a los Estados, las organizaciones internacionales pertinentes y el público [143].

Las funciones del OIEA en esa época no incluían el pronóstico de la evolución que podía tener un accidente, ni la evaluación de sus posibles consecuencias. Su función en la respuesta a una emergencia en una central nuclear se amplió mediante la aprobación del Plan de Acción del OIEA sobre Seguridad Nuclear [144]. En este se pedía al OIEA que proporcionara a los Estados Miembros, a las organizaciones internacionales y al público en general información oportuna, clara, correcta, objetiva y fácil de comprender sobre las posibles consecuencias de la emergencia, con inclusión de análisis de la información disponible y de pronósticos de los escenarios posibles sobre la base de los datos obtenidos, los conocimientos científicos y las capacidades de los Estados Miembros.

Recuadro 3.4. Marco internacional para la preparación y respuesta en situaciones de emergencia nuclear o radiológica existente en la época del accidente

El Estado es el principal responsable de la preparación y respuesta ante una emergencia nuclear o radiológica, así como de la protección de la vida y la salud humanas, los bienes y el medio ambiente. Incumbe al Estado velar por que en los planos nacional, regional y local, y a nivel de las entidades explotadoras y las instalaciones, existan disposiciones de preparación y respuesta para situaciones de emergencia. Cuando corresponda, el Estado será responsable asimismo de asegurar la coordinación de las disposiciones nacionales de preparación y respuesta en situaciones de emergencia con las disposiciones internacionales pertinentes a las que se haya adherido o en las que sea parte de algún otro modo (por ejemplo, en virtud de acuerdos bilaterales y/o multinacionales).

En la época del accidente, el marco internacional abarcaba instrumentos jurídicos internacionales, normas de seguridad del OIEA y disposiciones operacionales.

En la Convención sobre la Pronta Notificación de Accidentes Nucleares y la Convención sobre Asistencia en Caso de Accidente Nuclear o Emergencia Radiológica, en adelante denominadas Convención sobre Pronta Notificación y Convención sobre Asistencia, se asignan funciones y responsabilidades de respuesta específicas al OIEA y a las Partes. Diversas organizaciones internacionales —en virtud de sus funciones estatutarias o de instrumentos jurídicos conexos— desempeñan funciones y responsabilidades que abarcan aspectos de la preparación y respuesta en situaciones de emergencia [138, 139].

En la época del accidente, las normas de seguridad del OIEA en la esfera de la preparación y respuesta en situaciones de emergencia eran las de la publicación N° GS-R-2 de la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* (copatrocinada por siete organizaciones internacionales) y la publicación N° GS-G-2.1 de la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* (copatrocinada por seis organizaciones internacionales) [68, 69]. En las Normas Básicas Internacionales de Seguridad para la Protección Contra la Radiación Ionizante y para la Seguridad de las Fuentes de Radiación (*Colección Seguridad del OIEA*, N° 115) también había partes que se relacionaban con la preparación y respuesta en situaciones de emergencia [137].

Las disposiciones operacionales internacionales abarcaban el Manual sobre operaciones técnicas para la notificación y asistencia en situaciones de emergencia (ENATOM), la Red de Respuesta y Asistencia (RANET) del OIEA y el Plan Conjunto de las Organizaciones Internacionales para la Gestión de Emergencias Radiológicas (Plan Conjunto) [140 a 142].

El ENATOM facilitaba la aplicación de los artículos de la Convención sobre Pronta Notificación y la Convención sobre Asistencia que tenían carácter operativo, como las disposiciones relativas a la notificación y el intercambio de información y los protocolos de comunicación para los puntos de contacto señalados en esas dos convenciones (mediante mensajes por fax, teléfono, correo electrónico y un sitio web seguro y protegido a los que se podía responder las 24 horas del día). Estas medidas se practicaban en ejercicios periódicos de diversos grados de complejidad, denominados ejercicios de las Convenciones (ConvEx).

La RANET se estableció para facilitar la prestación de asistencia internacional, en respuesta a las solicitudes y en cumplimiento de la Convención sobre Asistencia. El sistema constituye un mecanismo operacional para prestar asistencia en diferentes esferas técnicas, con ayuda de los medios nacionales registrados en la red.

El Plan Conjunto describe una visión común de la forma en que cada organización ha de actuar durante la respuesta y en la adopción de las disposiciones de preparación para una emergencia nuclear o radiológica. Ofrece un mecanismo de coordinación y aclara las funciones y capacidades de las organizaciones internacionales participantes. Su mantenimiento corre a cargo del Comité Interinstitucional sobre Emergencias Radiológicas y Nucleares (IACRNE), al que el OIEA facilita los servicios de secretaría. En el momento del accidente formaban parte del IACRNE 15 organizaciones internacionales intergubernamentales.

La comunicación con el punto de contacto oficial en el Japón fue difícil en la primera fase de la respuesta a la emergencia. Con la visita del Director General del OIEA al Japón, del 17 al 19 de marzo de 2011, y el posterior despliegue de oficiales de enlace en Tokio, mejoró la comunicación entre el OIEA y el punto de contacto [143].

Algunos Estados proporcionaron asesoramiento o instrucciones específicas para la protección de sus nacionales en el Japón. Una parte de ellos aconsejaron a sus nacionales que se encontraban en el Japón que siguieran las órdenes y recomendaciones emitidas por las autoridades japonesas en respuesta a la emergencia, mientras que algunos facilitaron consejos que diferían de los proporcionados por las autoridades japonesas y por otros Estados [145]. Las diferencias entre las recomendaciones de los Estados obedecieron a diversas razones, entre ellas la falta de información sobre la evolución de la situación. En general, esas diferencias no se explicaron bien a la población, y en algunos casos generaron confusión e inquietud.

El OIEA envió misiones de expertos al Japón y coordinó los ofrecimientos de asistencia de los Estados Miembros a este país. No se invocó la Convención sobre Asistencia ni se utilizó la RANET⁸⁸. Los Estados proporcionaron asistencia al Japón directamente. Ese apoyo ayudó al Gobierno del Japón a gestionar la emergencia nuclear, que, junto con los efectos del terremoto y el tsunami, puso a prueba la capacidad de respuesta nacional. Una de las dificultades para aceptar la asistencia internacional en las primeras fases de la respuesta nacional fue la falta de disposiciones nacionales para recibirla [5, 143].

De conformidad con sus responsabilidades, la Secretaría del OIEA activó rápidamente el Plan Conjunto e inició de inmediato la coordinación de la respuesta interinstitucional. Los miembros del IACRNE intercambiaron información, centrándose en particular en lograr una visión común de las secuelas que tendría el accidente y coordinando los esfuerzos para mantener informado al público. Se celebraron videoconferencias periódicas hasta julio de 2011. También se publicaron comunicados de prensa conjuntos.

En el marco de los acuerdos bilaterales concertados entre las secretarías, la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) enviaron oficiales de enlace al OIEA para asegurar la coordinación eficaz de la respuesta internacional.

3.6. OBSERVACIONES Y LECCIONES APRENDIDAS

De la evaluación de la preparación y respuesta ante el accidente se desprenden varias observaciones y enseñanzas. La respuesta al accidente puso de relieve las lecciones aprendidas en emergencias anteriores y confirmó la importancia de una preparación adecuada para responder a las emergencias.

- **En la preparación para responder a una posible emergencia nuclear es necesario tener en cuenta las emergencias que puedan entrañar un daño severo del combustible nuclear del núcleo del reactor o del combustible gastado presente en el emplazamiento, incluidas las que afecten a varias unidades de una central con múltiples reactores y que puedan producirse en coincidencia con un desastre natural.**

Debe tomarse en consideración la posibilidad de que un accidente nuclear severo, independientemente de su causa, afecte a más de una unidad de un emplazamiento y coincida con un desastre natural, que pueda provocar una perturbación considerable del emplazamiento y de la infraestructura local. Los sistemas, las comunicaciones y los equipos de monitorización que

⁸⁸ La Secretaría del OIEA, junto con los Estados Miembros registrados en la RANET, sigue mejorando esa red sobre la base de la experiencia adquirida en el accidente de Fukushima Daiichi.

proporcionan información esencial para las respuestas dentro y fuera del emplazamiento deben ser capaces de funcionar en esas circunstancias.

Las instalaciones desde las que se gestionará la respuesta (por ejemplo, los centros de respuesta a la emergencia dentro y fuera del emplazamiento) se deben seleccionar o diseñar de modo que puedan funcionar en todo un abanico de condiciones de emergencia (radiológicas, laborales y ambientales), y se deben ubicar y/o proteger adecuadamente para garantizar su operabilidad y habitabilidad en esas condiciones.

- **El sistema de gestión de emergencias para responder a una emergencia nuclear debe incluir una clara definición de las funciones y responsabilidades de la entidad explotadora y de las autoridades locales y nacionales. El sistema, incluidas las interacciones de la organización explotadora con las autoridades, debe ponerse a prueba mediante ejercicios periódicos.**

Se precisan disposiciones que integren la respuesta a una emergencia nuclear con la respuesta a los desastres naturales o causados por el hombre (como los terremotos, inundaciones e incendios). La respuesta en el emplazamiento tiene que ser gestionada por personal que se encuentre en él y que conozca la central y la situación. Las respuestas dentro y fuera del emplazamiento tienen que coordinarse sobre la base de disposiciones planificadas con anterioridad.

- **Los trabajadores de emergencias deben estar designados de antemano, con una clara especificación de sus funciones, independientemente de la organización para la que trabajen, y deben recibir una capacitación adecuada y la debida protección durante la emergencia. Deben existir disposiciones para integrar en la respuesta a los trabajadores de emergencias que no hayan sido designados con anterioridad a la emergencia, y a los ayudantes que presten asistencia voluntaria en la respuesta a esta.**

Las disposiciones prácticas para la protección de los trabajadores de emergencias deben abordarse de manera sistemática y suficientemente detallada en los planes y procedimientos pertinentes. Debe tenerse en cuenta a las personas que puedan no haber sido designadas como trabajadores de emergencias en la fase de preparación. Los criterios de dosis para los trabajadores de emergencias deben fijarse por adelantado y aplicarse de forma coherente según las tareas de emergencia asignadas. Deben existir disposiciones para satisfacer debidamente las necesidades de los trabajadores de emergencias (incluido el contacto con sus familias).

Además, debe haber disposiciones previamente planificadas para integrar a los miembros de la población que prestan asistencia voluntaria en las medidas de respuesta (los denominados ‘ayudantes’) en la organización de la respuesta de emergencia y proporcionarles el nivel adecuado de protección radiológica.

- **Deben existir disposiciones que permitan adoptar decisiones sobre la aplicación de las medidas protectoras urgentes previamente determinadas para salvaguardar a la población, sobre la base de la existencia en la central de condiciones que se hayan definido con anterioridad.**

Esas disposiciones son necesarias porque en una emergencia los sistemas de apoyo a la adopción de decisiones, incluidos los que utilizan modelos informáticos, pueden no ser capaces de predecir la magnitud de una emisión radiactiva y el momento en que se producirá (el ‘término fuente’), el desplazamiento de los penachos, los niveles de deposición o las dosis resultantes con suficiente rapidez o exactitud como para constituir la única base para una decisión sobre la adopción de las medidas protectoras urgentes iniciales.

En la fase de preparación debe elaborarse un sistema de clasificación de emergencias basado en condiciones observables y en criterios mensurables (niveles de actuación de emergencia). Este sistema permite declarar una emergencia poco después de la detección en la central de condiciones que indiquen un daño real o proyectado en el combustible, y adoptar con prontitud las medidas protectoras urgentes previamente determinadas para salvaguardar a la población (en las zonas predefinidas) una vez que la entidad explotadora haya clasificado la emergencia. El sistema de clasificación de emergencias debe abarcar todo un abanico de condiciones anormales en la central.

- **Deben existir disposiciones que permitan ampliar o modificar las medidas protectoras urgentes en respuesta a la evolución de las condiciones en la central o a los resultados de la monitorización. También se precisan disposiciones que permitan adoptar medidas protectoras tempranas sobre la base de los resultados de la monitorización.**

En la fase de preparación deben establecerse disposiciones para, entre otras cosas: 1) definir las zonas y los espacios de planificación de emergencias; 2) establecer los criterios de dosis y operacionales (los niveles de cantidades mensurables) para la adopción de medidas protectoras urgentes y de otras medidas de respuesta, teniendo en cuenta a los grupos de población especiales que se encuentren dentro de las zonas de emergencia (por ejemplo, los pacientes hospitalizados); 3) posibilitar la adopción de medidas protectoras urgentes antes o poco después de una emisión de material radiactivo; 4) posibilitar el pronto establecimiento de controles del acceso a las zonas donde se estén aplicando medidas protectoras urgentes; 5) ampliar la aplicación de las medidas protectoras más allá de las zonas y los espacios de planificación de emergencias establecidos, si es necesario; 6) establecer los criterios de dosis y operacionales para la adopción de medidas protectoras tempranas y de otras medidas de respuesta (como la reubicación de la población y la imposición de restricciones al consumo de alimentos) que se justifiquen y se hayan optimizado, teniendo en cuenta una variedad de factores, tales como las consecuencias radiológicas y no radiológicas, incluidas las económicas, sociales y psicológicas; y 7) establecer arreglos que permitan revisar los criterios operacionales para la adopción de medidas protectoras tempranas en función de las condiciones imperantes.

- **Deben establecerse disposiciones para velar por que las medidas protectoras y otras medidas de respuesta adoptadas en una emergencia nuclear reporten más beneficios que daños. Para lograr ese equilibrio se requiere un enfoque integral de la adopción de decisiones.**

Estas disposiciones se tienen que elaborar con una clara comprensión de toda la gama de peligros para la salud que se pueden presentar en una emergencia nuclear y de las posibles consecuencias radiológicas y no radiológicas de toda medida protectora.

Las medidas protectoras se deben adoptar en el momento oportuno y de forma segura, teniendo en cuenta las posibles condiciones desfavorables (por ejemplo, las malas condiciones meteorológicas o el daño sufrido por la infraestructura). Deben hacerse preparativos por adelantado para la evacuación segura de las instalaciones especiales, como los hospitales y las residencias de ancianos; se debe prestar una atención o supervisión continua a quienes la necesiten.

- **Deben existir disposiciones para ayudar a los responsables de las decisiones, al público y a otras personas (por ejemplo, al personal médico) a comprender los peligros radiológicos para la salud que se dan en una emergencia nuclear, a fin de que adopten decisiones fundamentadas con respecto a las medidas protectoras. Asimismo, debe contarse con disposiciones para responder a las preocupaciones de la población a escala local, nacional e internacional.**

En una emergencia nuclear es necesario responder eficazmente a las preocupaciones de la población. Ello incluye disponer de medios para relacionar las cantidades mensurables (por ejemplo, las tasas de dosis) y las dosis de radiación proyectadas con los peligros radiológicos para la salud, de forma tal que las instancias decisorias (y la población) puedan adoptar decisiones fundamentadas con respeto a las medidas protectoras. La respuesta a las inquietudes de la población contribuye a mitigar las consecuencias radiológicas y no radiológicas de la emergencia.

Las preocupaciones internacionales se pueden atender, en parte, mediante sistemas de certificación que demuestren que todas las mercancías comercializables cumplen las normas internacionales y tranquilicen a los Estados importadores y a la población.

- **En la fase de preparación deben elaborarse disposiciones para la terminación de las medidas protectoras y de otras medidas de respuesta y para la transición a la fase de recuperación.**

En la fase de preparación deben planificarse la transición de la fase de emergencia a la de recuperación a largo plazo, y la reanudación de las actividades sociales y económicas normales. Las disposiciones deben comprender: 1) el establecimiento de procesos oficiales para decidir la terminación de las medidas protectoras y de otras medidas de respuesta; 2) la clara asignación de responsabilidades; 3) el establecimiento de criterios para la terminación de las medidas protectoras y de otras medidas de respuesta; y 4) la formulación de una estrategia y un proceso para la consulta con la población.

- **Un análisis oportuno de las emergencias y de las medidas adoptadas en respuesta a ellas, en que se extraigan enseñanzas y se determinen las mejoras posibles, fortalece las disposiciones de emergencia.**

El análisis tiene que abarcar un examen de todas las disposiciones pertinentes, con inclusión de las leyes y los reglamentos nacionales, la asignación de facultades y responsabilidades, los planes y procedimientos de respuesta a las emergencias, las instalaciones, el equipo, la capacitación y los ejercicios. El análisis proporciona una base para la revisión de las disposiciones, si es necesario. La idoneidad de las disposiciones de emergencia revisadas debe demostrarse mediante ejercicios.

— **Debe reforzarse la aplicación de las disposiciones internacionales sobre la notificación y la asistencia.**

Debe aumentarse el conocimiento de las disposiciones internacionales sobre la notificación y la asistencia en situaciones de emergencia nuclear o radiológica, así como de los mecanismos operacionales existentes, incluidos los mecanismos y procedimientos para la notificación y el intercambio de información, la solicitud y la prestación de asistencia internacional, etc. Es necesario mejorar la capacitación y los ejercicios relativos a los aspectos operacionales de la Convención sobre Pronta Notificación y la Convención sobre Asistencia.

La participación en los mecanismos existentes de prestación de asistencia internacional en el marco de la Convención sobre Asistencia tiene que ser parte integrante de las actividades nacionales de preparación para emergencias. En la fase de preparación deben establecerse disposiciones para solicitar y recibir asistencia (sobre la base de acuerdos bilaterales o en virtud de la Convención sobre Asistencia) en caso de emergencia nuclear o radiológica.

Las listas de los puntos de contacto designados oficialmente, según lo dispuesto en la Convención sobre Pronta Notificación y en la Convención sobre Asistencia, deben actualizarse continuamente y los puntos de contacto deben estar preparados para recibir solicitudes de información inmediatas del OIEA.

La aplicación de las normas de seguridad del OIEA sobre la preparación y respuesta en situaciones de emergencia a escala nacional mejoraría la preparación y la respuesta, facilitaría la comunicación durante las emergencias y contribuiría a armonizar los criterios nacionales relativos a las medidas protectoras y a otras medidas de respuesta.

— **Deben mejorarse las consultas y el intercambio de información entre los Estados sobre las medidas protectoras y otras medidas de respuesta.**

Las consultas y el intercambio de información entre los Estados sobre las medidas protectoras y otras medidas de respuesta en una emergencia contribuyen a lograr que la adopción de medidas sea coherente. Además, la explicación clara y comprensible de la base técnica para la adopción de decisiones sobre las medidas protectoras y otras medidas de respuesta es crucial para mejorar la comprensión y la aceptación públicas a escala nacional e internacional.

4. CONSECUENCIAS RADIOLÓGICAS

En la sección 4 se analizan las consecuencias radiológicas del accidente de la central nuclear de Fukushima Daiichi para las personas y para el medio ambiente. Las consecuencias radiológicas del accidente han sido examinadas por varios organismos y organizaciones internacionales. La OMS publicó una estimación preliminar de las dosis de radiación [146] y posteriormente evaluó el riesgo atribuido al accidente [147]. Más recientemente, el UNSCEAR estimó los niveles de radiación y sus efectos [148]. Las lecciones relacionadas con la protección radiológica han sido recopiladas por la ICRP [149, 150]. Otras organizaciones internacionales, en particular la FAO y la OMM, también han proporcionado información pertinente. Algunas de estas actividades internacionales se describen en el recuadro 4.1.

Recuadro 4.1. Actividades internacionales relacionadas con las consecuencias radiológicas del accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi

Además del OIEA, otros órganos internacionales han estudiado activamente las consecuencias radiológicas del accidente ocurrido en la central nuclear de Fukushima Daiichi:

- La Organización Mundial de la Salud (OMS), un organismo especializado de las Naciones Unidas que se ocupa de la salud pública, dio a conocer una estimación preliminar de las dosis de radiación que se recibieron a causa del accidente [146] y, posteriormente, una evaluación del riesgo para la salud [147].
- El Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR), que rinde informes a la Asamblea General de las Naciones Unidas, comunicó sus estimaciones de los niveles y efectos de la exposición a la radiación atribuible al accidente, con una cantidad considerable de datos sobre la radiactividad ambiental y las dosis de radiación [148].
- La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), un órgano internacional de expertos de carácter no gubernamental que publica recomendaciones ampliamente utilizadas en materia de protección radiológica, publicó un examen de las cuestiones que se plantearon a ese respecto durante el accidente y después de él, con el fin de mejorar el sistema internacional de protección radiológica [149, 150].
- La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), un organismo especializado de las Naciones Unidas que se ocupa de las prácticas agrícolas, forestales y pesqueras con el fin de lograr una buena nutrición y la seguridad alimentaria para todos, trabajó en colaboración con el OIEA, por conducto del Comité Interinstitucional sobre Emergencias Radiológicas y Nucleares (IACRNE), en la preparación y respuesta para situaciones de emergencia nuclear o radiológica que afectaran a la alimentación, la agricultura, la silvicultura y la pesca, y recopiló una base de datos considerable sobre las concentraciones de radionucleidos en los alimentos causadas por el accidente [151].
- La Organización Meteorológica Mundial (OMM), un organismo especializado de las Naciones Unidas que se ocupa de la meteorología, la hidrología operacional y las ciencias geofísicas conexas, publicó una evaluación de los análisis meteorológicos relativos a la dispersión y deposición de radionucleidos a raíz del accidente [152].
- La Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (AEN de la OCDE) informó sobre la respuesta relativa a la seguridad nuclear y las lecciones aprendidas del accidente [153].
- Estas y otras organizaciones tales como el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Organización Internacional del Trabajo (OIT), la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y la Comisión Europea (CE) copatrocinan la elaboración de *normas de seguridad* internacionales que se publican bajo los auspicios del OIEA. La OMS establece las *Guías para la calidad del agua potable*, que se aplican a las situaciones de exposición existentes y que contienen parámetros para la radiactividad en el agua potable [154]. La Comisión del Codex Alimentarius, de la FAO y la OMS, establece el *Codex Alimentarius*, una colección de normas alimentarias armonizadas internacionalmente para proteger la salud de los consumidores y promover prácticas leales en el comercio internacional de alimentos, que contienen patrones relativos a los radionucleidos presentes en los alimentos [155].

Órganos oficiales de muchos Estados, entre ellos el Japón, realizaron numerosas evaluaciones de las consecuencias radiológicas del accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi (véase, por ejemplo, la referencia [5]). Organizaciones profesionales nacionales que se ocupan de la protección radiológica, en el Japón y en otras partes, extrajeron importantes lecciones en esa esfera (véase, por

ejemplo, la referencia [156]). La prefectura de Fukushima inició en junio de 2011 [158] el Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima [157]. Este estudio, que se describe en el recuadro 4.2, fue examinado en el Simposio Internacional de Expertos organizado en Fukushima [159, 160].

Recuadro 4.2. El Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima

El Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima es un examen general y una investigación de la situación sanitaria de la población de la prefectura de Fukushima [157]. Se basa en una serie de cuestionarios y tiene los siguientes objetivos: “1) evaluar la dosis de radiación recibida por los residentes, y 2) vigilar el estado de salud de los residentes, para lograr la prevención de las enfermedades, la detección precoz y el tratamiento médico temprano, y de esa forma 3) mantener y promover su salud en el futuro” [161].

Tras recibir las respuestas a los cuestionarios, el Instituto Nacional de Ciencias Radiológicas (NIRS) estimó las dosis efectivas recibidas por exposición externa en los cuatro meses siguientes al accidente nuclear, sobre la base de los desplazamientos señalados por los encuestados y del conocimiento de los niveles de radiación pertinentes. Además, se realizaron los siguientes estudios detallados: 1) exámenes de la tiroides por ultrasonido, practicados a unos 370 000 residentes que tenían entre 0 y 18 años de edad en el momento del accidente nuclear (con un cribado inicial en los tres primeros años después del accidente, seguido de exámenes completos de la tiroides a partir de 2014 y de un seguimiento regular de los residentes después de eso); 2) un reconocimiento completo de la salud para detectar y tratar las enfermedades en una fase precoz y para prevenir las enfermedades relacionadas con el modo de vida, destinado principalmente a 210 000 exresidentes de las zonas evacuadas cuyos modos de vida habían cambiado drásticamente después del accidente (además de las pruebas de rutina del reconocimiento médico general practicado en el lugar de trabajo o por la administración local, se están efectuando pruebas adicionales tales como el recuento diferencial de leucocitos); 3) un Estudio de la Salud Mental y el Modo de Vida encaminado a prestar una atención adecuada, principalmente a los evacuados que están más expuestos a desarrollar problemas de salud mental, como el trastorno de estrés postraumático, la ansiedad y el estrés; y 4) un estudio sobre los embarazos y los partos, destinado a ofrecer atención médica y apoyo adecuados a las madres que recibieron una libreta de salud maternoinfantil entre el 1 de agosto de 2010 y el 31 de julio de 2011, y a sus hijos. (Este estudio se actualiza cada año para tener en cuenta los nuevos datos, especialmente sobre los embarazos y los partos [162].)

La Universidad Médica de Fukushima recibió de la prefectura de Fukushima el mandato de realizar un estudio de la salud, y puso en marcha el Centro de Ciencia Médica para las Radiaciones del Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima con el fin de llevar a cabo un estudio básico de las estimaciones de las dosis externas y cuatro estudios detallados. Este estudio y sus resultados se evalúan periódicamente en la Reunión del Comité de Supervisión de la Prefectura para el Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima.

La presente sección se basa en estos datos, evaluaciones y estimaciones nacionales e internacionales y hace uso de la nueva información disponible, en particular de la que las autoridades japonesas proporcionaron al OIEA para la elaboración del presente informe. Cabe señalar que las estimaciones presentadas en los diversos informes nacionales e internacionales se realizaron en diferentes momentos y con distintos niveles de información. Por consiguiente, aunque es posible hacer algunas comparaciones directas de los diversos resultados, las diferencias entre los datos, la metodología y las fechas de los estudios dificultan una comparación detallada.

Cantidades y unidades

Para monitorizar y comunicar los datos radiológicos del accidente se utilizaron cantidades⁸⁹ y unidades⁹⁰ [163, 164] internacionales especializadas. Las cantidades y unidades internacionales fundamentales de la protección radiológica utilizadas en este informe se describen brevemente en el recuadro 4.3.

⁸⁹ El término cantidad se emplea en el presente informe en su sentido científico, que es el de una propiedad mensurable, en este caso de fenómenos tales como la radiactividad o la radiación.

⁹⁰ La unidad de una cantidad es una porción definida de esa cantidad, que se utiliza como patrón de medición.

Recuadro 4.3. Cantidades y unidades fundamentales de la protección radiológica utilizadas en este informe

La cantidad que se emplea para describir la radiactividad se denomina *actividad* y su unidad de medida es el *becquerel* (Bq). Un becquerel representa un nivel de actividad extremadamente bajo. Por ejemplo, el cuerpo humano (de una persona de 70 kg, con 140 g de potasio en el organismo) contiene alrededor de 5000 Bq de potasio 40 radiactivo natural. Por lo tanto, para medir las grandes emisiones de radionucleidos del accidente, se emplea en este informe un prefijo adecuado, por ejemplo peta (P): 1 petabecquerel (PBq) equivale a 10^{15} Bq.

La emisión de materiales radiactivos expuso a las personas a radiación ionizante, tanto por *exposición externa*, debida a la actividad fuera del cuerpo, como por *exposición interna*, en el caso de los radionucleidos incorporados en el organismo (por ejemplo, por ingestión o inhalación o a través de la piel). La cantidad que describe la exposición media a la radiación experimentada por los órganos y tejidos se denomina *dosis absorbida* y su unidad de medida es el julio por kilogramo, denominado *gray* (Gy), expresado a menudo en milésimas de Gy, o *miligray* (mGy).

A los efectos de la protección radiológica, la dosis absorbida tiene que ponderarse, porque diferentes tipos de radiación tienen distintos niveles de eficacia en cuanto al daño producido, y los diversos órganos y tejidos tienen diferentes sensibilidades a la exposición a la radiación. La cantidad resultante de la aplicación de *factores de ponderación de la radiación* a la dosis absorbida por los órganos y tejidos se denomina *dosis equivalente*, y su unidad es el *sievert* (Sv), expresado habitualmente en milésimas de Sv, o *milisievert* (mSv). En este informe se emplean también las milésimas de mSv, o *microsievert* (μ Sv). La cantidad resultante de la aplicación de *factores de ponderación del tejido* se denomina *dosis efectiva*, y se mide también en mSv. Aunque hay cierta variación en el efecto que una determinada exposición a la radiación produce en las distintas personas, para los fines de la protección radiológica las dosis se estiman como si se hubiesen aplicado a un individuo de referencia ideal definido, ya que no es posible tener en cuenta las diferencias individuales.

La *dosis absorbida* y la *dosis equivalente* se utilizan para las dosis recibidas por los tejidos y órganos. Dado el tipo de radiación de que se trató, en todas las exposiciones a la radiación causadas por el accidente (salvo algunas exposiciones insignificantes a neutrones) las dosis absorbidas notificadas eran numéricamente iguales a las dosis equivalentes correspondientes, y vice versa. La *dosis efectiva* se utiliza para evaluar las repercusiones en el cuerpo entero. Una exposición interna continuará mientras las sustancias radiactivas inhaladas o ingeridas permanezcan en el cuerpo. La *dosis comprometida* causada por esta exposición continua se calcula como la dosis que se prevé que recibirá la persona expuesta durante toda su vida.

Las siguientes estimaciones de dosis efectivas comunes pueden servir de referencia [165]:

- La radiación de fondo natural global imparte una dosis efectiva media anual de 2,4 mSv, con un rango típico de 1 a 13 mSv, y grandes grupos de población reciben entre 10 y 20 mSv y, en casos extremos, hasta 100 mSv aproximadamente.
- El promedio mundial de la dosis efectiva anual debida al radiodiagnóstico médico es de 0,6 mSv, y una tomografía computarizada puede administrar una dosis efectiva de alrededor de 10 mSv. (Cabe señalar que la exposición médica es por lo general una exposición localizada en una parte del cuerpo, que no se distribuye de manera uniforme en todo el organismo).

Otras cantidades utilizadas en la práctica se derivan de las cantidades fundamentales de la protección radiológica. En el recuadro 4.4 se describen algunas de esas cantidades derivadas y varias cuestiones conexas. Las numerosas cantidades y unidades no fueron fáciles de entender para la población después del accidente. La ICRP, en su evaluación de las cuestiones de protección radiológica surgidas durante el accidente y después de él, concluyó que en el futuro deberían adoptarse medidas internacionales para “resolver la confusión relativa a las cantidades y unidades utilizadas en la protección” [149].

Recuadro 4.4. Cantidades medidas y términos operacionales

En la protección radiológica, las cantidades correspondientes a la *dosis equivalente* y la *dosis efectiva* no se pueden medir directamente. Por lo tanto, los instrumentos que miden la exposición externa, ya sea la que experimentan las personas o la que está presente en el medio ambiente (o en el aire ambiente), se calibran utilizando cantidades operacionales denominadas *dosis equivalente personal* y *dosis equivalente ambiental*, respectivamente. Estos son *indicadores indirectos* de las cantidades utilizadas en la protección radiológica, es decir, son cantidades medidas que permiten inferir el valor de la cantidad de interés, y se miden también en mSv. Estas cantidades operacionales se utilizaron para la monitorización tras el accidente y se emplean en el presente informe al hacer referencia a los valores monitorizados.

Según el tipo de situación de exposición, se utilizan términos particulares para facilitar la explicación del concepto de control de la exposición, a saber:

- En las *situaciones de exposición planificadas*¹, se emplea la *dosis adicional*, la dosis que se prevé que se añadirá con una operación planificada. En estas situaciones, las restricciones de dosis individual pertinentes se denominan *límites de dosis*. Los límites de dosis son los valores que no deben superarse en las dosis efectivas adicionales o las dosis equivalentes adicionales que se prevé recibirán las personas como resultado de una situación de exposición planificada; se aplican a las dosis individuales adicionales provocadas por la exposición externa en un determinado período de tiempo, más el compromiso de dosis individual adicional derivado de la incorporación de radionucleidos en ese período de tiempo.
- En las *situaciones de exposición de emergencia*², se utilizan tres conceptos de dosis: 1) la *dosis proyectada* (la dosis que se prevé que se recibiría si no se adoptaran medidas de protección); 2) la *dosis evitable* (la dosis que puede evitarse si se adoptan medidas de protección); y 3) la *dosis residual* (la dosis que se prevé que se recibirá en las *situaciones de exposición existentes*³ una vez que hayan concluido las medidas de protección). Respecto de las dosis residuales se aplican *niveles de referencia* como niveles orientativos para optimizar la protección. El nivel de referencia representa el nivel de dosis “por encima del cual se considera inadecuado permitir una exposición planificada y por debajo del cual debería optimizarse la protección” [129].

Hay también cantidades derivadas de la *actividad*, como las relacionadas con la presencia de radiactividad en el medio ambiente que expresan, por ejemplo, la actividad en la tierra o en productos de consumo público. Las cantidades derivadas que interesan son la *densidad de deposición*, que expresa la *actividad por unidad de superficie*, por lo general en Bq/m²; la *actividad específica*, que expresa la *actividad por unidad de masa o peso*, por lo general en Bq/kg; y la *concentración de actividad*, que expresa la *actividad por unidad de volumen*, por lo general en Bq/L. Estas cantidades se suelen denominar *contaminación*. Este término se ha definido formalmente en las normas internacionales como: 1) la *presencia* de radionucleidos sobre superficies, o dentro de sólidos, líquidos o gases (incluido el cuerpo humano), cuando tal presencia no es ni intencionada ni deseable, o 2) el *proceso* que provoca la presencia de esas sustancias en dichos lugares, en ambos casos sin ninguna indicación de la magnitud del riesgo que entraña. Sin embargo, el término *contaminación* tiene una connotación de impureza o peligro que no está incluida en su definición formal como presencia o proceso.

¹ Las *situaciones de exposición planificadas* se producen como resultado de la explotación planificada de fuentes de radiación (como el funcionamiento normal de la central nuclear de Fukushima Daiichi) o de operaciones planificadas que dan lugar a la exposición a fuentes de radiación. Puesto que es posible tomar disposiciones de protección y seguridad por adelantado, las exposiciones pueden restringirse desde el comienzo. En las situaciones de exposición planificadas está previsto que se produzca un cierto nivel de exposición.

² Las *situaciones de exposición de emergencia* incluyen las situaciones de exposición que se dan como resultado de un accidente y que requieren la pronta adopción de medidas para evitar o reducir las consecuencias adversas.

³ Las *situaciones de exposición existentes* son las situaciones de exposición que ya existen cuando se ha de tomar una decisión sobre la necesidad de control, e incluyen la exposición debida al material radiactivo residual tras una emergencia nuclear o radiológica una vez que se ha declarado terminada la situación de exposición de emergencia.

Incertidumbres

Las estimaciones de las consecuencias radiológicas del accidente están sujetas a varias incertidumbres, que a menudo se expresan como un intervalo de valores probables de las cantidades pertinentes. Algunas de estas incertidumbres se han eliminado mediante un análisis estadístico de las variables implicadas, por ejemplo en las estimaciones de la dosis de radiación personal debida a la exposición externa, pero no todas las incertidumbres se han resuelto. Si bien los riesgos relacionados con la exposición a la radiación se comprenden mejor que los que se derivan de la exposición a otros agentes, es importante que las incertidumbres pertinentes se traten y comuniquen correctamente [166, 167].

Análisis estadísticos

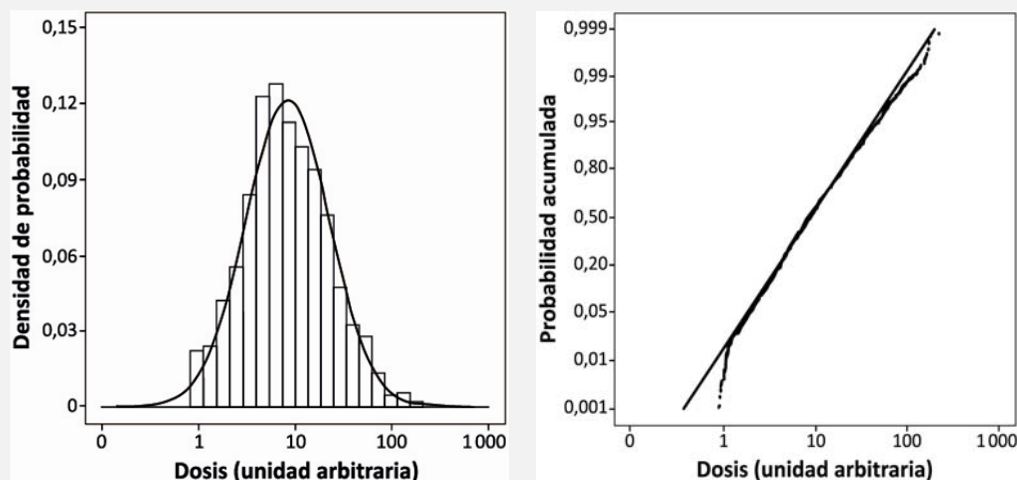
Para reducir las incertidumbres se realizaron análisis estadísticos de los datos de algunas variables pertinentes. Esas variables incluyeron la actividad específica en los alimentos y, en particular, las dosis de radiación personal. Los análisis de las dosis de radiación abarcaron las estimaciones basadas en el uso de cuestionarios y de datos sobre la radiación ambiente y medioambiental, y aquellas basadas en la monitorización individual mediante dosímetros personales y el conteo de cuerpo entero de la radiactividad incorporada. La base utilizada para los análisis estadísticos se resume en el recuadro 4.5, que describe las distribuciones de probabilidad de los datos, en particular la *distribución de probabilidad log-normal* que se empleó específicamente en los análisis. Hay muchas circunstancias en que cabe prever que múltiples datos de medición, incluidas las mediciones de cantidades ambientales, tengan una distribución estadística que se aproxime a una distribución de probabilidad log-normal. Se dispone de gran cantidad de información sobre la distribución estadística de las dosis recibidas por las poblaciones expuestas, que muestran distribuciones log-normales aproximadas. Las pruebas pertinentes a este respecto proceden de las estimaciones de las dosis ocupacionales del UNSCEAR [168] y también del análisis de las dosis recibidas por la población tras el accidente de la central nuclear de Chernóbil en 1986 [169]. Sin embargo, en los análisis de los datos presentados con distribuciones log-normales se plantearon varios problemas, algunos de los cuales se resumen en el recuadro 4.6.

Recuadro 4.5. Análisis estadístico de los datos estimados y medidos

Algunos datos de interés utilizados en este informe —en particular los relativos a las dosis personales y también a la actividad en los alimentos— se sometieron a un análisis estadístico. Los valores de la cantidad variable (por ejemplo, los valores de la actividad o la dosis) se clasificaron con arreglo a su distribución de frecuencias. Para ello, el rango completo de datos se dividió en *clases* o *bins*, es decir, en una serie de pequeños intervalos de valores numéricos, a los que se asignaron los datos para el análisis. Los datos de cada clase se presentaron luego en las barras adyacentes de un *histograma*, que es un diagrama consistente en rectángulos correspondientes a las clases, cuyas posiciones representan los valores de la cantidad y cuya dimensión representa el número de datos de cada clase. A continuación, el histograma se normalizó multiplicando los valores de los rectángulos por un factor que confirió al área total de los rectángulos un valor igual a 1. Cuando se dispone de suficientes datos y los intervalos se vuelven muy pequeños, el histograma tiende a dar una curva lisa que se denomina *función de densidad de probabilidad* y que describe la probabilidad relativa de que la cantidad (por ejemplo la actividad en los alimentos o la dosis recibida por las personas) tenga un valor dado.

Aunque la distribución más común es la *normal* (o de Gauss), representada por una función de densidad de probabilidad en forma de campana que es simétrica con respecto a la probabilidad máxima, la distribución más útil para los fines del presente informe es la *logarítmica normal*, o *log-normal*. La distribución log-normal es la distribución de probabilidad de una cantidad, como la actividad o la dosis, cuyo logaritmo tiene una distribución normal. Así pues, la función de densidad de probabilidad log-normal es simétrica con respecto al valor máximo solo cuando se representa como una función del logaritmo de la cantidad (por ejemplo, del logaritmo de la actividad o el logaritmo de la dosis), y no como una función de la cantidad. En la parte izquierda de la figura siguiente se ilustra un ejemplo de esa distribución de probabilidad log-normal, que muestra un histograma idealizado y su función de densidad de probabilidad.

Recuadro 4.5. Análisis estadístico de los datos estimados y medidos (cont.)



La función de densidad de probabilidad puede *integrarse*, es decir, los valores de las clases del histograma normalizado pueden sumarse, de los valores más bajos a los más altos de la cantidad. Esa sumatoria como función de la cantidad se denomina *función de probabilidad acumulada* y describe la probabilidad de que una cantidad con una distribución de probabilidad dada tenga un valor inferior o igual a ese valor.

La *función de probabilidad acumulada log-normal* se pudo trazar como una línea recta en un plano de coordenadas en que las abscisas representaban la cantidad (por ejemplo, la dosis) calibrada logarítmicamente y las ordenadas representaban la probabilidad acumulada calibrada como una función *normal*. En la parte derecha de la figura anterior se muestra un ejemplo de esa representación, en que aparece la integral de los datos experimentales efectivos de las clases del histograma de la izquierda en relación con una línea recta.

Recuadro 4.6. Problemas planteados por la distribución log-normal de los datos

Si bien la agrupación de los conjuntos de datos por clases produce generalmente una distribución relativamente pareja de los niveles de las clases, en algunos de los conjuntos de datos de la información presentada no era así. En esos conjuntos de datos las distribuciones de las clases estaban distorsionadas, por lo general debido a la acumulación de una gran cantidad de datos en una clase particular. Por ejemplo, en algunos conjuntos de datos todos los valores cercanos al límite de detección estaban acumulados en una misma clase (la inicial), sin discriminación, mientras que los valores más altos estaban debidamente discriminados. En los análisis estadísticos se tomó la decisión de distribuir estos datos erróneamente acumulados con arreglo a una distribución de la densidad de probabilidad derivada de los valores reales (utilizando sus valores estadísticos pertinentes, como la media aritmética y la desviación estándar), construyendo de esta manera una distribución conjetural, creada aleatoriamente, con un número mayor de clases. El resultado es un histograma conceptual adaptado a los valores estadísticos de los datos reales y al que se puede ajustar una curva de densidad de probabilidad pareja. Esta función de densidad de probabilidad, que describe cómo debería ser idealmente la distribución si se dispusiera de datos suficientemente detallados y discriminados, se presenta junto con la función de probabilidad acumulada en las figuras pertinentes del informe. En una de las figuras se presenta también la distribución real de las clases, para fines de comparación.

Recuadro 4.6. Problemas planteados por la distribución log-normal de los datos (cont.)

Aunque la adhesión a la distribución log-normal puede no ser perfecta en todo el rango de los datos, por lo general pueden elaborarse explicaciones de las desviaciones, en particular de las desviaciones de la línea recta en la probabilidad acumulada, y esas explicaciones constituyen una parte importante del análisis. Una causa de desviación es la incertidumbre que se deriva de las propias mediciones y del carácter estadístico del proceso de muestreo. Un problema particular de los análisis de las dosis recibidas, que es típico de las situaciones de accidente, fue el carácter probablemente no homogéneo de las cohortes de personas expuestas. Otra de las causas fue la distribución forzada de los datos; por ejemplo, a dosis elevadas puede haber una probabilidad acumulada superior a la prevista (es decir, menos personas de lo previsto recibieron una dosis alta), en cuyo caso la explicación más probable es que las restricciones de dosis fueron eficaces. Si los valores son superiores a lo previsto en el rango de las dosis bajas (es decir, si más personas que las previstas recibieron dosis bajas), una explicación plausible es que se asignó (equivocadamente) una dosis igual al límite de detección a todas las personas con dosis inferiores a esos niveles; a la inversa, si los valores son inferiores a lo previsto, puede significar que se asignó una dosis de cero (también en este caso, equivocadamente) a todas las personas con dosis inferiores al nivel de detección. En algunos casos, se observan desviaciones de la línea recta debido al alto grado de incoherencia en los datos locales; por ejemplo, cuando se mezclaron dos grupos de población diferentes, como los evacuados y los residentes que permanecieron en la zona, ello puede reflejarse en un cambio de gradiente en la distribución de probabilidad acumulada, correspondiendo cada sector a las dosis recibidas en cada zona. En algunos casos la recopilación de información se prolongó y ello distorsionó los datos, por ejemplo debido a la desintegración radiactiva con el paso del tiempo. Las desviaciones de la linealidad en un gráfico de la probabilidad acumulada log-normal pueden utilizarse para hacer inferencias plausibles sobre los datos en que se basa.

4.1. RADIATIVIDAD EN EL MEDIO AMBIENTE

El accidente dio lugar a la emisión de radionucleidos al medio ambiente. Muchas organizaciones hicieron evaluaciones de las emisiones empleando diferentes modelos. La mayor parte de las emisiones a la atmósfera fueron transportadas hacia el este por los vientos dominantes, depositándose en el océano Pacífico Norte y dispersándose dentro de él. Las incertidumbres en las estimaciones de la cantidad y la composición de las sustancias radiactivas fueron difíciles de resolver, entre otras cosas por la falta de datos de monitorización de la deposición de las emisiones atmosféricas en el océano.

Los cambios en la dirección del viento hicieron que una parte relativamente pequeña de las emisiones atmosféricas se depositara en la tierra, principalmente hacia el noroeste de la central nuclear de Fukushima Daiichi. La presencia y la actividad de los radionucleidos depositados en el medio ambiente terrestre se monitorizaron y caracterizaron. La actividad medida de los radionucleidos se reduce con el paso del tiempo debido a los procesos de desintegración física y transporte medioambiental, así como a las actividades de limpieza.

Además de los radionucleidos que entraron en el océano por deposición atmosférica, hubo emisiones líquidas y descargas desde la central nuclear de Fukushima Daiichi directamente al mar frente al emplazamiento. El desplazamiento preciso de los radionucleidos en el océano es difícil de determinar solo con mediciones, pero se han utilizado varios modelos de transporte oceánico para estimar la dispersión oceánica.

Algunos radionucleidos emitidos, como el ^{131}I , ^{134}Cs y ^{137}Cs , fueron encontrados en el agua potable, en alimentos y en algunos productos no comestibles. En respuesta al accidente, las autoridades japonesas establecieron restricciones para evitar el consumo de estos productos.

4.1.1. Emisiones

Se ha realizado un gran número de evaluaciones de las emisiones de radionucleidos producidas por el accidente de la central nuclear de Fukushima Daiichi con ayuda de modelos y métodos matemáticos bien establecidos y con los códigos informáticos conexos (véanse las referencias [170 a 177]).

En la primera fase del accidente, los gases nobles ^{85}Kr y ^{133}Xe , con períodos de semidesintegración de 10,76 años y 5,25 días, respectivamente, contribuyeron a la exposición externa causada por el penacho de las emisiones atmosféricas. El ^{131}I , que es de corta duración, con un período de semidesintegración de 8,02 días, contribuyó a las dosis equivalentes recibidas en la glándula tiroides, cuando hubo ingestión o inhalación. El ^{134}Cs y el ^{137}Cs , que duran más tiempo, con períodos de semidesintegración de 2,06 años y 30,17 años, respectivamente, contribuyeron a las dosis equivalentes y efectivas a través de la exposición interna y externa. Aunque el ^{131}I decae con relativa rapidez, puede dar lugar a dosis equivalentes relativamente altas en la glándula tiroides. En algunas zonas, el ^{137}Cs puede permanecer en el medio ambiente y, en ausencia de medidas de restauración, podría seguir contribuyendo a las dosis efectivas recibidas por las personas.

También se emitieron radionucleidos del estroncio, el rutenio y algunos actínidos (como el plutonio) en cantidades variables. Como se señaló en la sección 2.1, entre las 5.30 y las 10.50 horas del 13 de marzo se detectaron neutrones cerca de la entrada principal de la central (situada a aproximadamente 1 km de las Unidades 1 a 3). Se estima que los neutrones se generaron por fisión nuclear espontánea de radionucleidos que pueden haberse emitido como consecuencia del daño sufrido por el núcleo del reactor. Este fenómeno era previsible, y se ha notificado la presencia de esos radionucleidos en niveles relativamente bajos.

Emisiones a la atmósfera

Los gases nobles constituyeron una parte importante de las primeras emisiones de la central nuclear de Fukushima Daiichi; se estima que se emitieron entre 6000 y 12 000 PBq de ^{133}Xe (o entre 500 y 15 000 PBq, si se incluyen las primeras estimaciones). La actividad total media del ^{131}I emitido fue de entre 100 y 400 PBq, y la del ^{137}Cs , de entre 7 y 20 PBq (o de 90 a 700 PBq y de 7 a 50 PBq, si se incluyen las primeras estimaciones). Se estima que las emisiones producidas por el accidente equivalieron aproximadamente a una décima parte de las generadas por el accidente de la central nuclear de Chernóbil en 1986 [169, 178, 179]. La mayor parte de las emisiones se dispersaron por el océano Pacífico Norte; como resultado de ello, la cantidad y la composición isotópica del material emitido (el ‘término fuente’) no se pudieron reconfirmar con mediciones medioambientales de los depósitos de radionucleidos [177].

Emisiones al mar

La mayor parte de las emisiones atmosféricas que se dispersaron por el Pacífico Norte se depositaron en la capa superficial del océano. Hubo emisiones directas, y también descargas en el mar frente al emplazamiento; la principal fuente de agua altamente radiactiva fue una zanja de la central nuclear de Fukushima Daiichi. Las emisiones radiactivas más altas se observaron a comienzos de abril de 2011. Las emisiones y descargas directas de ^{131}I al mar se estimaron en 10 a 20 PBq. Las emisiones y descargas directas de ^{137}Cs se estimaron en valores de entre 1 y 6 PBq, en la mayoría de los análisis, pero algunas evaluaciones dieron estimaciones de entre 2,3 y 26,9 PBq [175].

4.1.2. Dispersión

Se han empleado muchos modelos teóricos para estimar los patrones de dispersión. Se realizaron extensas mediciones de la concentración de actividad del ^{131}I , el ^{134}Cs y el ^{137}Cs en el medio ambiente, incluidos el aire, el suelo, el agua del mar, los sedimentos y la biota, que se han empleado también para estimar la dispersión de las emisiones.

Dispersión atmosférica

El transporte de las emisiones atmosféricas radiactivas fue principalmente hacia el norte y el este del Japón, siguiendo la dirección de los vientos dominantes, y luego alrededor del globo. En la figura 4.1 se presenta un ejemplo de los numerosos modelos de transporte atmosférico utilizados para estimar el transporte atmosférico de los diversos radionucleidos y sus patrones de deposición, que describen los resultados de la modelización de la dispersión mundial del ^{137}Cs [180]. La figura ilustra la concentración de actividad en el aire utilizando el código de colores original de la referencia, en que pequeñas variaciones en el grado del color corresponden a un cambio de un orden de magnitud en la concentración de actividad. La ilustración tiene por objeto corroborar la conclusión de que la concentración de actividad en la atmósfera disminuyó notablemente con la distancia de la central nuclear de Fukushima Daiichi.

Redes de monitorización radiológica de alta sensibilidad detectaron niveles extremadamente bajos de radiactividad atribuible al accidente incluso en Europa y América del Norte. Pero los efectos de estas emisiones en el nivel de radiactividad medioambiental de fondo en el mundo fueron insignificantes.

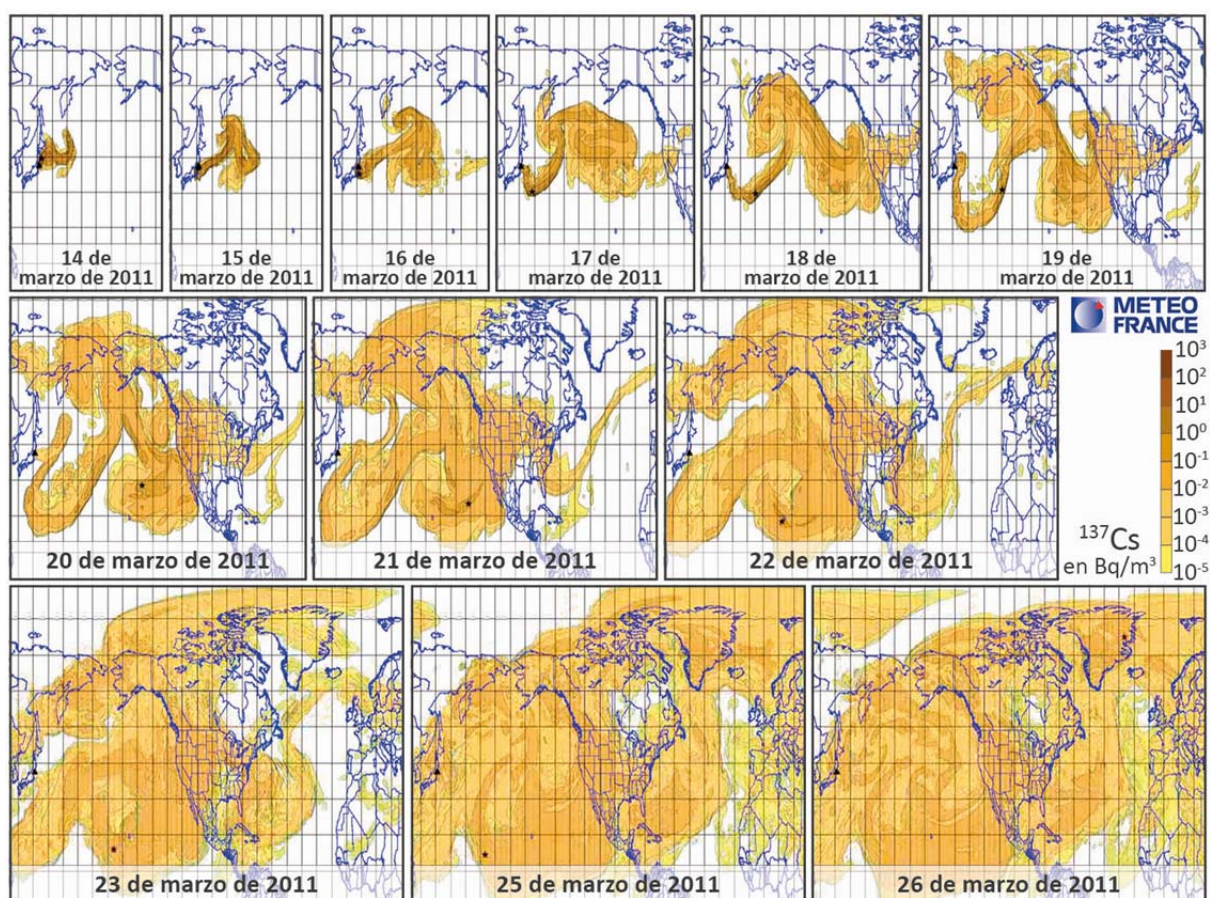


Fig. 4.1. Resultados de uno de los modelos globales de dispersión atmosférica del ^{137}Cs , presentados en su código de colores original (véanse los detalles en la referencia [180]) (ilustración: cortesía de Météo-France).

Dispersión oceánica de las emisiones directas y las descargas en el mar frente al emplazamiento

La mayoría de los radionucleidos emitidos y descargados en el mar frente al emplazamiento fueron transportados hacia el este con la corriente de Kuroshio⁹¹, se desplazaron por grandes distancias en el giro del Pacífico Norte⁹² y quedaron muy diluidos en el agua del mar [181]. La radiactividad se propagó por grandes distancias oceánicas y fue detectada en cantidades ínfimas muy lejos del accidente, en algunos casos por vías que pasaban por la biota oceánica, por ejemplo el atún de aleta azul [182].

Aunque el desplazamiento preciso de los radionucleidos en el océano es difícil de determinar solo con mediciones, se han utilizado varios modelos de transporte oceánico para estimar sus patrones de dispersión. En la figura 4.2 se ilustran ejemplos de esos modelos que describen la dispersión del ¹³⁷Cs en el océano Pacífico Norte. La figura utiliza el código de colores original de cada referencia particular. Como en el caso de la dispersión atmosférica, pequeñas variaciones del grado o tono de los colores corresponden a un cambio de un orden de magnitud en la concentración de actividad. La ilustración tiene por objeto corroborar la conclusión de que la actividad en el océano disminuyó notablemente con la distancia de la central nuclear de Fukushima Daiichi. Todos los modelos muestran que la actividad del ¹³⁷Cs en el océano fue muy baja.

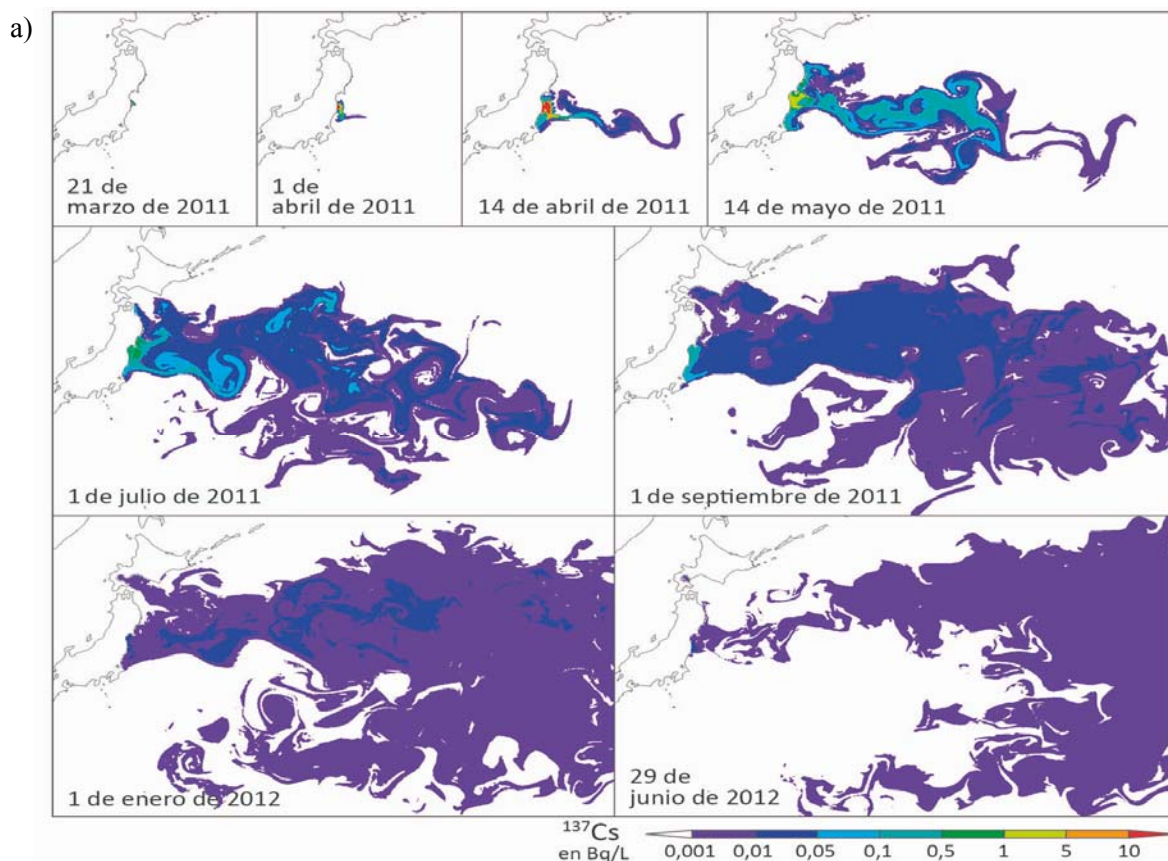


Fig. 4.2. Se han utilizado diversos modelos oceánicos para estimar la concentración de actividad del ¹³⁷Cs en el agua del mar (el código de colores y las unidades utilizadas son las que se emplearon en las referencias): a) ejemplo de una modelización de las aguas contaminadas entre el 21 de marzo de 2011 y el 29 de junio de 2012 [183, 184].

⁹¹ La corriente de Kuroshio es una corriente oceánica que fluye hacia el norte por el lado occidental del océano Pacífico Norte y que pasa por delante de la central nuclear de Fukushima Daiichi.

⁹² El giro del Océano Pacífico Norte es uno de los cinco principales giros oceánicos y abarca la mayor parte del Pacífico Norte; tiene un flujo circular en sentido horario y está conformado por la corriente del Océano Pacífico Norte por el norte, la corriente de California por el este, la corriente ecuatorial del norte por el sur y la corriente de Kuroshio por el oeste.

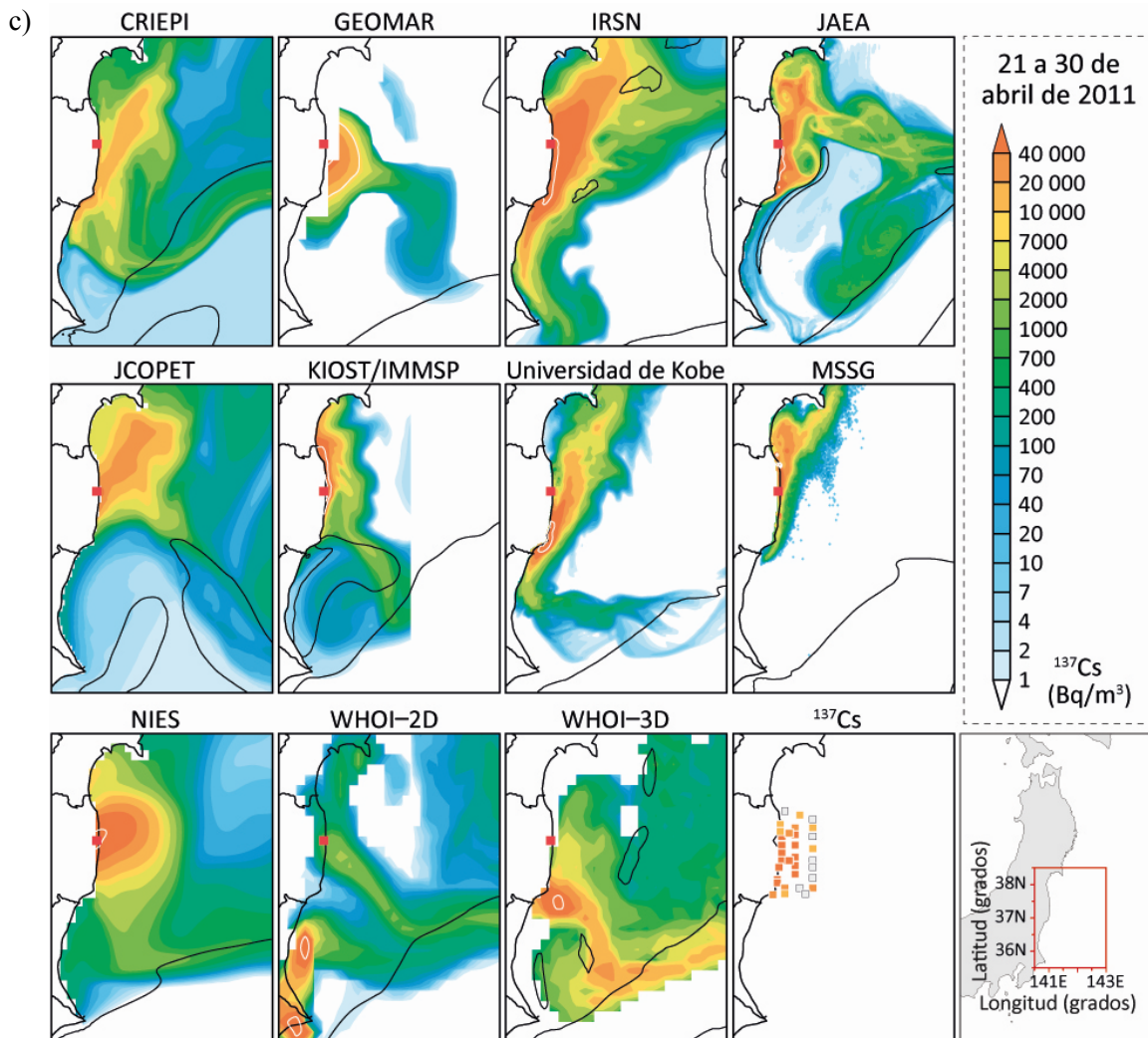
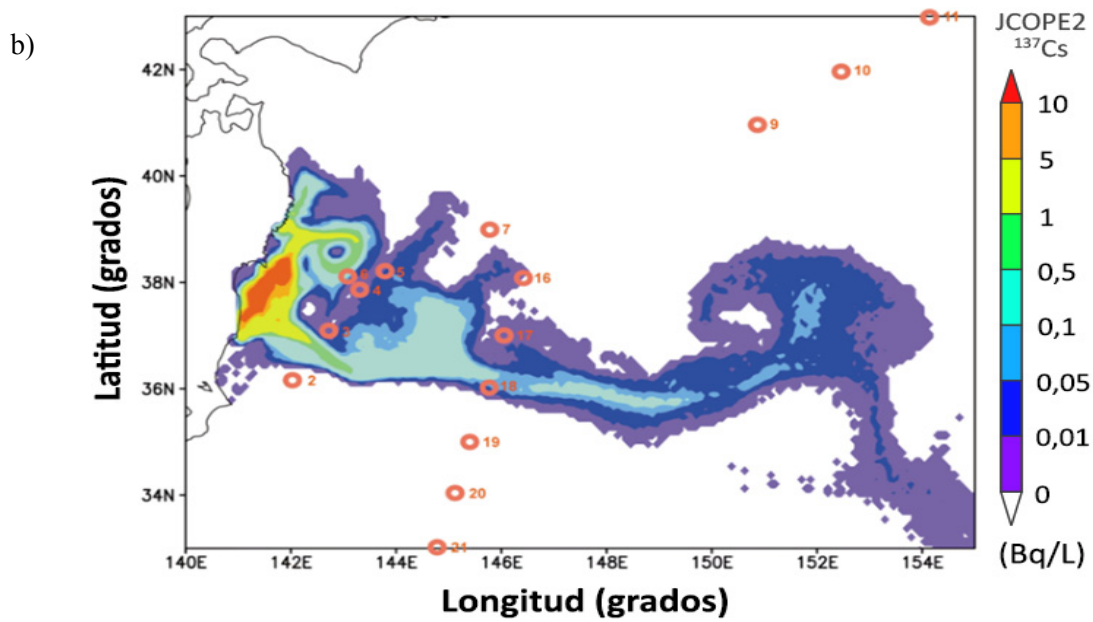


Fig. 4.2. (cont.) Se han utilizado diversos modelos oceánicos para estimar la concentración de actividad del ^{137}Cs en el agua del mar (el código de colores y las unidades utilizadas son las que se emplearon en las referencias): b) distribución horizontal simulada del ^{137}Cs en las aguas superficiales entre el 14 y el 26 de abril de 2011 [185]; c) distribución horizontal de las concentraciones promedio del ^{137}Cs en un período de diez días, del 21 al 30 de abril de 2011; los nombres de los modelos aparecen indicados encima de cada imagen [175].

4.1.3. Deposición

La actividad depositada en la superficie de la Tierra se cuantifica como densidad de deposición y se mide en términos de la actividad por unidad de superficie, expresada generalmente en Bq/m^2 . Cuando la deposición es terrestre, se suele denominar ‘contaminación’ terrestre.

Deposición oceánica

La deposición del ^{137}Cs en el océano fue estudiada con ayuda de diferentes modelos (véase la figura 4.3).

Es difícil presentar una estimación exacta de la cantidad de ^{137}Cs emitido a la atmósfera que se depositó en la superficie del océano [186]. Como referencia, se estima que la deposición global de ^{137}Cs antes del accidente, en 1970, era de $290 \pm 30 \text{ PBq}$ y el nivel típico (de fondo) del ^{137}Cs en el océano Pacífico Norte era de aproximadamente 69 PBq [187, 188].

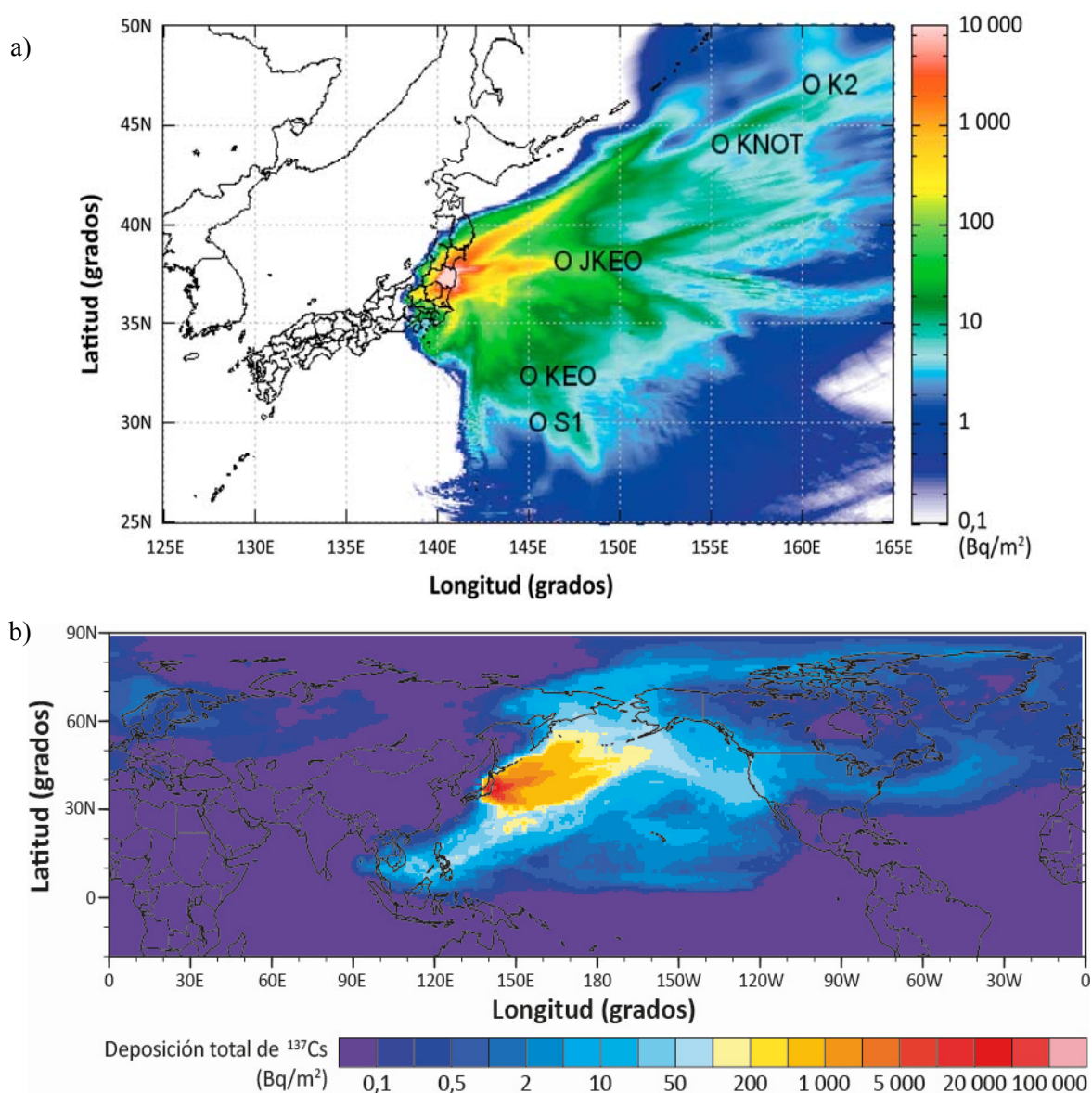


Fig. 4.3. Se han utilizado diversos modelos para estimar la densidad de deposición oceánica del ^{137}Cs (las unidades empleadas son Bq/m^2). a) Modelización de la aportación eólica acumulada al 1 de abril de 2011 [185]; y b) ejemplo de la deposición promedio del ^{137}Cs del conjunto multimodelo (del 11 al 31 de marzo de 2011) [175].

Deposición terrestre

Aunque la mayoría de las emisiones atmosféricas se dispersaron hacia el este, las que se produjeron el 12, 14 y 15 de marzo fueron transportadas por el viento tierra adentro, y los radionucleidos correspondientes, en particular el ^{131}I , el ^{134}Cs y el ^{137}Cs , se depositaron sobre el suelo. Los patrones de deposición variaron considerablemente, dependiendo en gran medida de las lluvias, las nevadas y otras condiciones locales o regionales, como la topografía y el uso de la tierra. Otro factor que influyó en el patrón de deposición en el medio ambiente terrestre fueron las diferentes características físicas y químicas del yodo y el cesio.

Los mayores depósitos de larga duración de ^{137}Cs se encontraron al noroeste de la central nuclear de Fukushima Daiichi, donde se estimó que la deposición total de ^{137}Cs en la superficie terrestre de Japón había sido de unos 2 a 3 PBq [188]. La densidad de deposición se reduce con el tiempo a causa del decaimiento físico y ambiental. El cesio se puede desplazar con relativa facilidad en el medio ambiente debido a la solubilidad de sus compuestos. Los efectos de meteorización, como los provocados por el viento y la lluvia, y otros efectos ambientales pueden reducir la presencia del cesio en el medio ambiente. Todos estos efectos reducen la presencia de ^{137}Cs en un tiempo más breve que su período de semidesintegración. En muchas zonas afectadas, el ^{137}Cs ha disminuido aún más gracias a las limpiezas y otros trabajos de restauración.

En la figura 4.4 se presentan mapas detallados de la dosis equivalente ambiental medida desde el aire al noroeste del lugar del accidente, y su variación con el tiempo (véase también la figura 4.2 c)).

La presencia de ^{137}Cs provocada por el accidente en el medio ambiente terrestre puede dar lugar a exposiciones prolongadas de las personas, además de la que ya experimentan normalmente debido a los niveles de radiación natural de fondo. Existe un nivel mundial de fondo de densidad de deposición del ^{137}Cs que es atribuible principalmente a la lluvia radiactiva causada por los ensayos nucleares del pasado. El UNSCEAR ha estimado que a mediados de los años sesenta los niveles globales de fondo alcanzaban valores de aproximadamente 4000 Bq/m^2 a latitudes de entre 40° y 50° en el hemisferio norte; los valores globales más bajos en esa época, de algunos centenares de Bq/m^2 , se registraban a latitudes de entre 60° y 70° en el hemisferio sur [190]. Varios estudios analizaron la influencia de las condiciones locales y llegaron a la conclusión de que la deposición de fondo acumulada puede haber alcanzado o incluso superado los $10\,000 \text{ Bq/m}^2$ (véase, por ejemplo, la referencia [187]). Los niveles globales de deposición han disminuido desde los años sesenta. Para el año 2000 el UNSCEAR estimó un valor máximo de aproximadamente 2000 Bq/m^2 [190].

En zonas situadas al noroeste de la central nuclear de Fukushima Daiichi se midieron niveles de densidad de deposición del ^{137}Cs considerablemente más altos. Expresados en órdenes de magnitud, los niveles de las zonas más afectadas eran del orden de $10\,000\,000$ de Bq/m^2 , y muchas zonas tenían niveles de alrededor de $1\,000\,000$ de Bq/m^2 . La distribución de los depósitos en toda la zona afectada de la prefectura de Fukushima no era homogénea, y los niveles en la parte inmediatamente exterior a las zonas más afectadas de la prefectura de Fukushima eran de aproximadamente $10\,000 \text{ Bq/m}^2$. Si bien algunas otras regiones del Japón presentaban niveles de deposición elevados, los niveles atribuibles al accidente en la mayor parte del país eran, en general, inferiores a 1000 Bq/m^2 aproximadamente [191, 192].

Los niveles más altos de ^{131}I depositado superaron los $3\,000\,000$ de Bq/m^2 inmediatamente después del accidente, pero, debido al breve período de semidesintegración del ^{131}I , su presencia disminuyó rápidamente y ya no es mensurable.

4.1.4. Productos de consumo

En las zonas afectadas se encontraron radionucleidos tales como el ^{131}I , el ^{134}Cs y el ^{137}Cs en algunos productos de consumo y otros artículos de uso diario de las personas y los hogares, como los alimentos, el agua potable y algunos productos no comestibles.

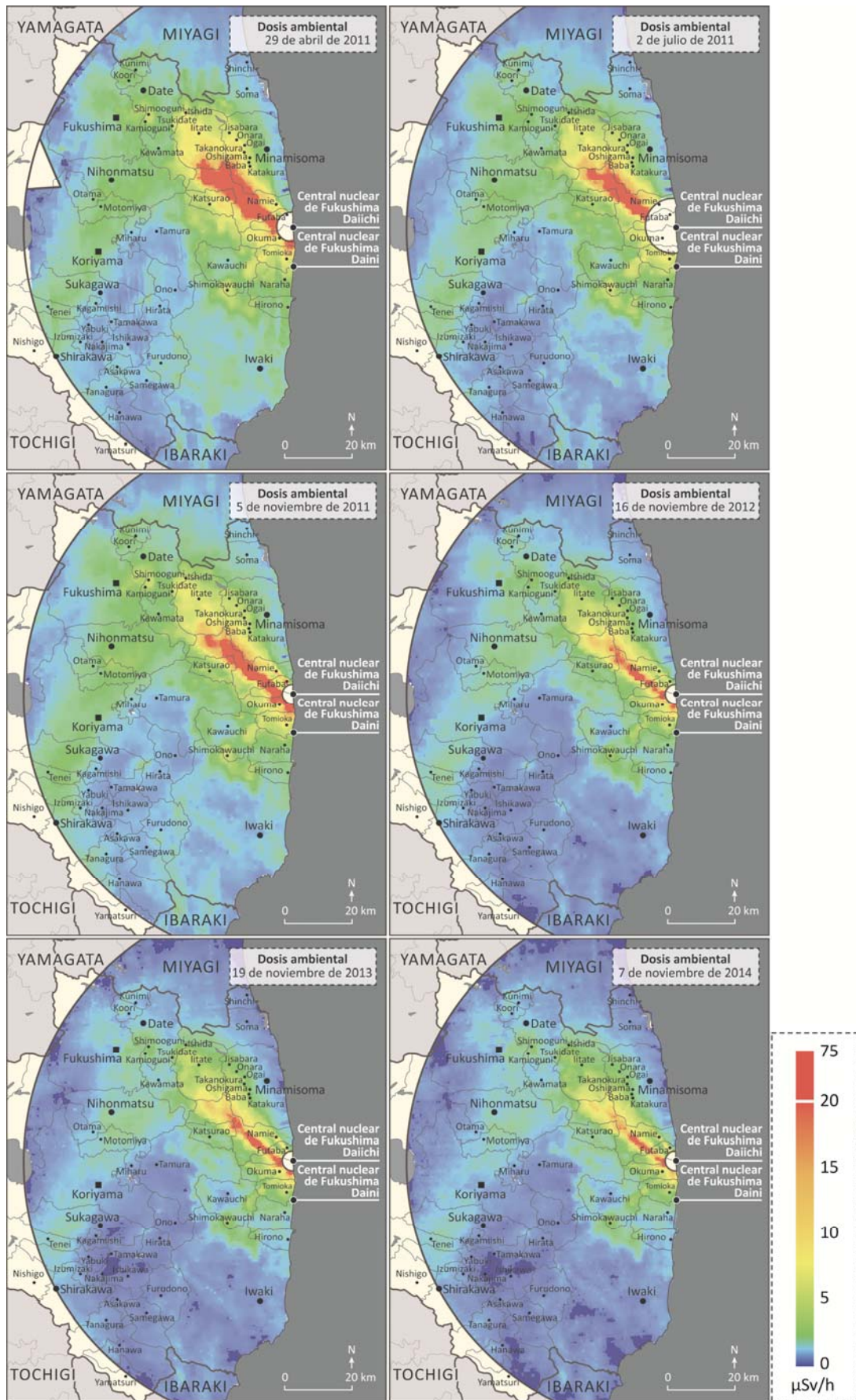


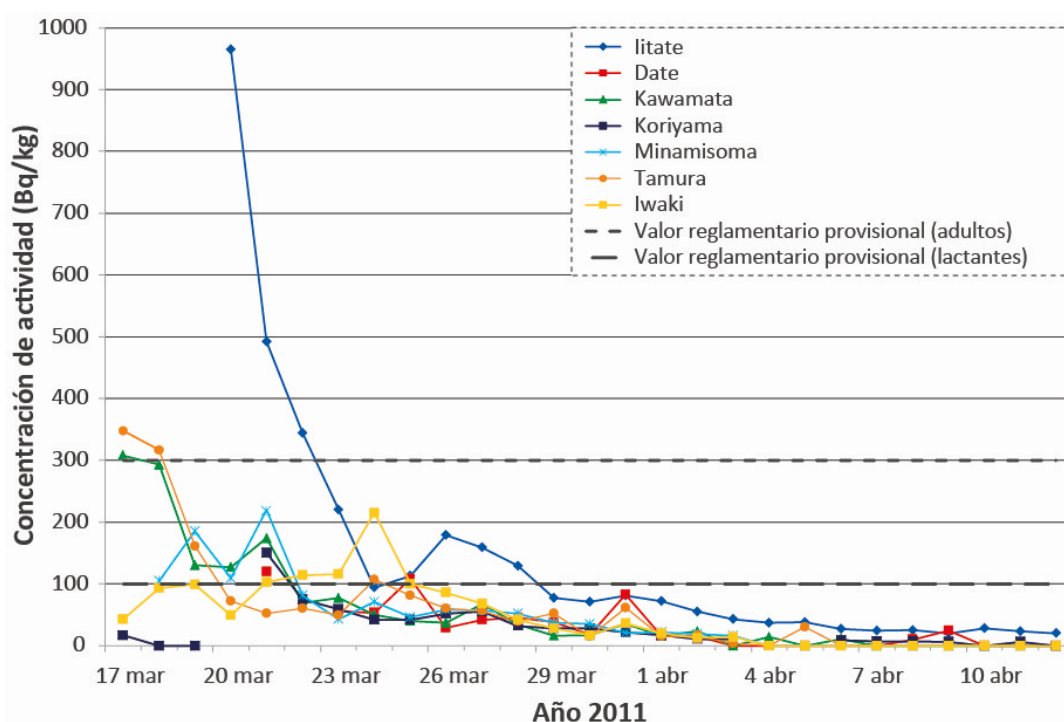
Fig. 4.4. Tasa de dosis equivalente ambiental medida desde el aire (en $\mu\text{Sv/h}$) resultante de los depósitos de las emisiones que se dispersaron por las zonas situadas al noroeste de la central [189].

Después del accidente, el 21 de marzo, las autoridades japonesas establecieron restricciones para evitar el consumo de agua potable y alimentos que contuvieran radionucleidos en niveles superiores a los valores reglamentarios provisionales (véase la sección 3).

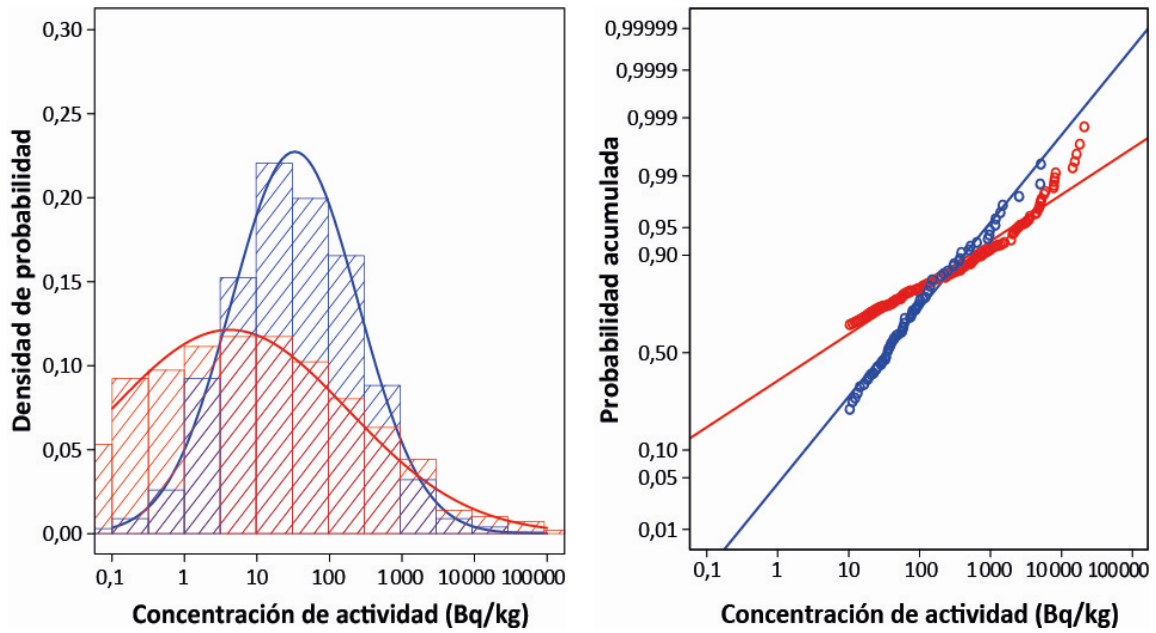
Los valores de referencia de la OMS para los niveles permisibles de radionucleidos en el agua potable están definidos para circunstancias normales (véase el recuadro 4.1). Después de abril de 2012, toda el agua potable del Japón tenía niveles inferiores a los valores de referencia de la OMS [193].

Con raras excepciones, los niveles de radionucleidos en los alimentos disponibles en el mercado no excedieron de los valores establecidos en el Codex Alimentarius, que se aplican al comercio internacional (véase el recuadro 4.1). En algunos casos se encontraron niveles de radionucleidos superiores en alimentos no cultivados, como la carne de jabalí, las setas silvestres y plantas silvestres tales como los helechos [194]. El consumo de alimentos no cultivados es poco frecuente en el Japón. Las plantas silvestres son consumidas por un número reducido de personas y en su mayor parte durante un período limitado en primavera. Son muy raras las ventas directas de los agricultores de setas y plantas silvestres. Las setas cultivadas se pueden comprar en el mercado, si los niveles de concentración de actividad son inferiores a los valores reglamentarios.

En la figura 4.5 se presentan algunos ejemplos de concentraciones de actividad en el agua potable y de actividades específicas en alimentos. La evolución temporal de la concentración de actividad del ^{131}I medida en los suministros de agua potable se ilustra para diferentes lugares de la prefectura de Fukushima, en comparación con los niveles establecidos en las normas provisionales publicadas por las autoridades japonesas [195]. Se determinaron las distribuciones log-normales de la densidad de probabilidad y la probabilidad acumulada para la actividad específica del ^{131}I en la leche durante el primer mes después del accidente y en las hortalizas de hoja en los tres primeros meses después del accidente. Para la actividad específica del ^{134}Cs y el ^{137}Cs en las setas (principalmente las setas cultivadas al aire libre), se determinaron durante los 12 meses siguientes al accidente. Estas determinaciones, que se basan en el análisis estadístico de los datos reunidos por la FAO [151], ilustran una probabilidad de alrededor del 90 % de que los valores fueran inferiores al nivel del Codex Alimentarius de 1000 Bq/kg (el nivel establecido por las autoridades japonesas fue inicialmente de 500 Bq/kg y se redujo luego a 100 Bq/kg [193]). Este criterio prudente creó dificultades para los productores y los consumidores.

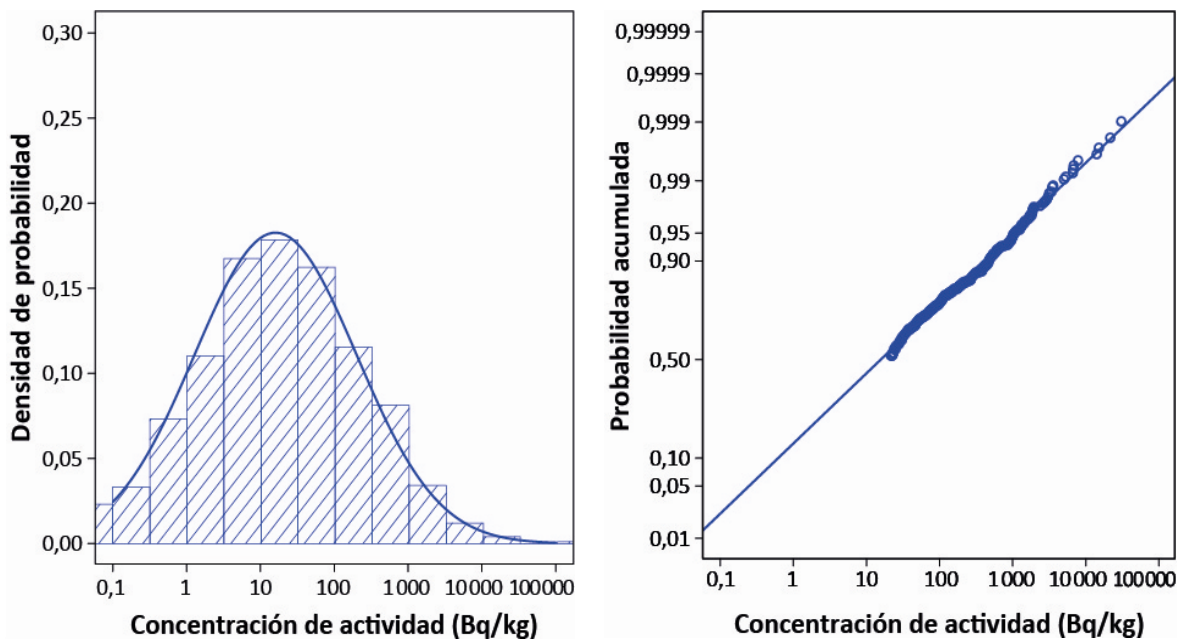


a)



— ^{131}I : Leche - primer mes: Promedio = 34 Bq/kg, rango del IC del 95 % = (0,65, 1800) Bq/kg
 — ^{131}I : Hortalizas de hoja - primeros 3 meses: Promedio = 4,3 Bq/kg, rango del IC del 95 % = (0,0025, 7300) Bq/kg

b)



— ^{134}Cs y ^{137}Cs : Promedio = 16 Bq/kg, rango del IC del 95 % = (0,11, 2200) Bq/kg

c)

Fig. 4.5. Algunos ejemplos de radiactividad en el agua potable y en alimentos. a) Evolución temporal de la concentración de actividad del ^{131}I medida en el suministro de agua potable en diversos lugares de la prefectura de Fukushima [195]. b) Distribución de probabilidad log-normal de la concentración de actividad del ^{131}I en la leche en el primer mes después del accidente y en las hortalizas de hoja en los primeros tres meses después del accidente. c) Distribución de probabilidad log-normal de la concentración de actividad del $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$ en las setas en los 12 meses siguientes al accidente [151]. (Las figuras b) y c) presentan la distribución de la densidad de probabilidad normalizada idealizada (véase el recuadro 4.6) y la distribución de probabilidad acumulada; en la concentración de actividad en los alimentos se utilizó un límite de detección nominal de 10 Bq/kg.)

4.2. PROTECCIÓN DE LAS PERSONAS CONTRA LA EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN

Después del accidente, las autoridades japonesas aplicaron los niveles de referencia de las dosis prudentes que figuraban en las recomendaciones de la ICRP recientes⁹³. La aplicación de algunas de las acciones y medidas de protección resultó difícil para las autoridades competentes y muy problemática para las personas afectadas.

Hubo algunas diferencias entre los criterios y orientaciones nacionales e internacionales para el control del agua potable, los alimentos y los productos de consumo no comestibles a plazo más largo después del accidente, una vez terminada la fase de emergencia.

Las personas estuvieron expuestas a la radiación atribuible al accidente por varias rutas diferentes, denominadas vías de exposición. Estas se examinan en el recuadro 4.7. Las dosis de radiación recibidas por las personas se estimaron mediante modelizaciones y/o mediciones medioambientales y personales a través de las diversas vías de exposición. A continuación esas estimaciones y mediciones se utilizaron para restringir la exposición y asegurar la protección de las personas.

4.2.1. Restricción de la exposición de la población

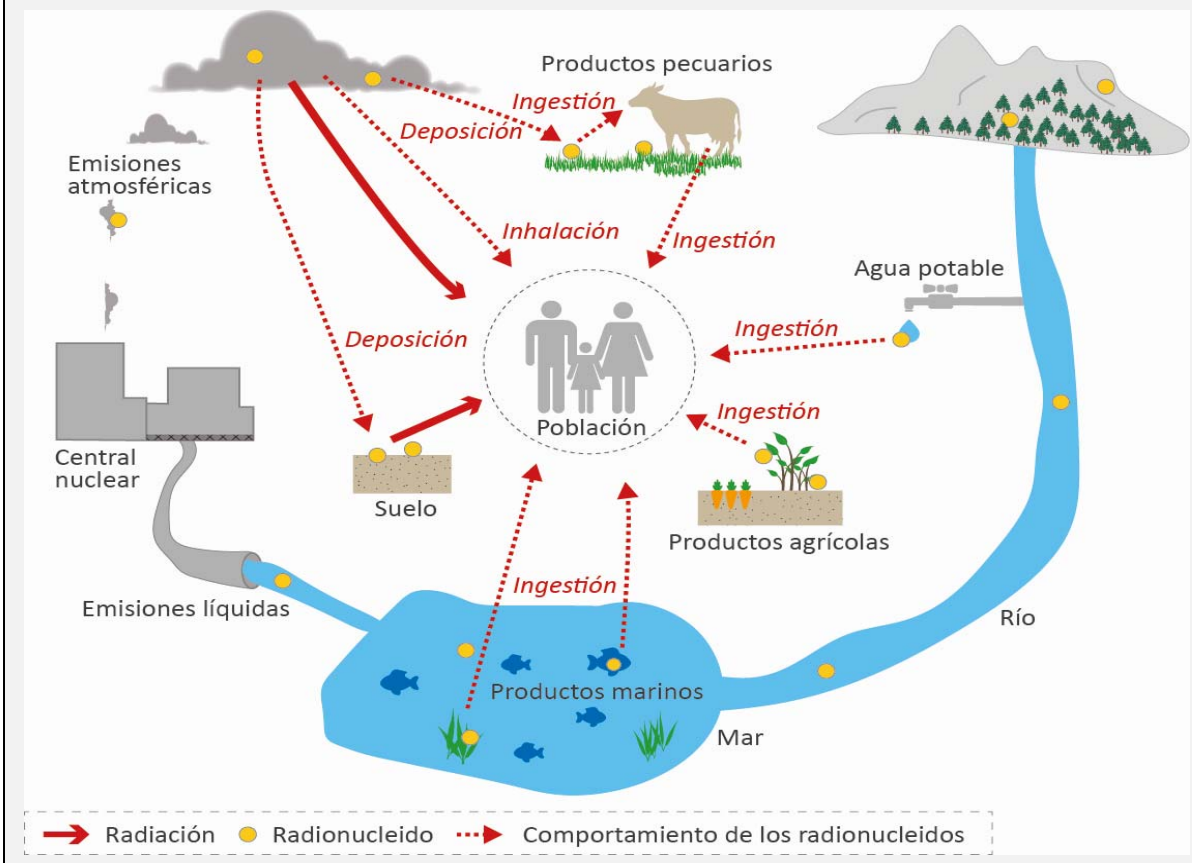
La versión de las Normas Básicas de Seguridad (NBS) aplicable en la época del accidente se había publicado en 1996 [137] y se basaba en las recomendaciones de la ICRP publicadas en 1990 [196]. Incluía prescripciones relativas a los niveles de intervención en caso de accidente, considerando las dosis proyectadas previstas y las posibles reducciones de las dosis evitables. En el momento del accidente, las NBS de 1996 se estaban revisando para que reflejaran las recomendaciones de la ICRP que se habían publicado en 2007 [129] (véase el recuadro 4.8). Esas recomendaciones contenían un enfoque diferente para hacer frente a las emergencias, y en particular revisaban el concepto del nivel de intervención, concebido como criterio para la adopción de medidas protectoras individuales, y establecían el concepto de los niveles de referencia, que se utilizarían para decidir las estrategias de protección (en el entendimiento de que se introducirían criterios genéricos en las normas de seguridad para la adopción de medidas protectoras individuales).

Las recomendaciones de la ICRP de 2007 proporcionaban un marco para los niveles de referencia, con ejemplos de todas las situaciones de exposición, incluidas las de emergencia. Como un ejemplo relativo a la dosis residual planificada más alta en una emergencia radiológica, se recomendaban niveles de referencia que podían superar los 20 mSv, como dosis aguda o anual, pero no los 100 mSv. También se recomendaba que se estudiaran las posibilidades de reducir las dosis, que se desplegaran esfuerzos crecientes para reducir las dosis que se aproximaran a 100 mSv, que las personas recibieran información sobre el riesgo radiológico y sobre las medidas para disminuir las dosis, y que se realizaran determinaciones de las dosis individuales. El órgano regulador del Japón, el OSNI, optó por aplicar el nivel de referencia más bajo, de 20 mSv/año, para la protección de la población.

⁹³ La ICRP publica recomendaciones internacionales sobre la protección radiológica. Estas recomendaciones se tienen en cuenta al preparar las normas de seguridad internacionales, incluidas las normas de protección radiológica (las Normas Básicas Internacionales de Seguridad para la Protección Contra la Radiación Ionizante y para la Seguridad de las Fuentes de Radiación (las Normas Básicas de Seguridad o NBS)) elaboradas y establecidas por varias organizaciones internacionales, que se han publicado bajo los auspicios del OIEA. Las NBS se utilizan en todo el mundo al elaborar las reglamentaciones nacionales para la protección de las personas y del medio ambiente contra los posibles efectos nocivos de la exposición a la radiación ionizante. Las recomendaciones de la ICRP de 2007 proporcionaron un marco revisado para la protección radiológica. Esas recomendaciones incluían el establecimiento de niveles de referencia para las estrategias de protección. En el momento del accidente las NBS estaban en revisión, entre otras cosas para incorporar esas recomendaciones.

Recuadro 4.7. Vías de exposición

Las vías de exposición son las trayectorias, las secuencias de cambios o los sucesos que constituyen la progresión por la que las sustancias radiactivas se desplazan a través del medio ambiente y finalmente exponen a las personas a recibir dosis de radiación. Esas vías se caracterizan por muchos aspectos, entre ellos el proceso por el que las sustancias llegan al medio ambiente, los medios en los que se desplazan a partir de la fuente, el punto de exposición en que las personas se ven afectadas por la radiación, las rutas de exposición que describen las formas en que la radiación externa afecta a las personas y los modos en que las sustancias radiactivas pueden penetrar en el cuerpo (por ejemplo, mediante la ingestión de alimentos o bebidas o a través de la piel), y la población que puede estar expuesta. La figura siguiente da una descripción simplificada de las vías de exposición tras el accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi.



Protección de los niños

La protección de los niños fue una preocupación especial de los padres en las zonas afectadas por el accidente. A los efectos de la protección, las recomendaciones actuales de la ICRP utilizan un coeficiente de riesgo ajustado al detrimento para toda la población, incluidos los niños, que es superior (en un 30 % aproximadamente) al de la población adulta. Esta diferencia se refleja en las recomendaciones y normas internacionales sobre protección radiológica.

Efectos de las acciones y medidas de protección radiológica adoptadas para proteger a la población

La existencia de una adecuada infraestructura de servicios públicos es esencial para respaldar las medidas encaminadas a limitar la exposición de la población después de una emergencia nuclear o radiológica [199]. Las consecuencias del terremoto, el tsunami y el accidente tuvieron que afrontarse en una situación de colapso de la infraestructura local. Debido al terremoto y al tsunami, muchos servicios públicos, viviendas y empresas habían quedado destruidos o dañados, y el acceso a las comunicaciones telefónicas y a Internet, los suministros de electricidad, gas y agua potable, el

transporte público y la distribución de alimentos, gasolina y petróleo para la calefacción estaban gravemente afectados. La temperatura exterior era baja, caía lluvia y nieve, y la calefacción era insuficiente. Por ello, muchos residentes no podían permanecer en los albergues por períodos prolongados sin ropa gruesa ni abrigos.

Estas difíciles condiciones afectaron a la ejecución de las medidas protectoras necesarias para salvaguardar a la población de la exposición a la radiación. Por ejemplo, las personas que se encontraban en albergues no pudieron ser descontaminadas mediante el lavado, porque en la mayoría de los albergues el agua estaba racionada y se reservaba para beber.

Recuadro 4.8. Revisión de las Normas Básicas de Seguridad que estaban en vigor en la época del accidente: niveles de referencia

Las normas internacionales de seguridad para la protección radiológica en vigor en la época del accidente eran las Normas Básicas Internacionales de Seguridad para la Protección Contra la Radiación Ionizante y para la Seguridad de las Fuentes de Radiación de 1996, o las NBS de 1996 [137]. Estas normas prescribían que la dosis efectiva adicional que recibieran las personas como resultado de las prácticas planificadas y reguladas se limitara a 1 mSv por año (en circunstancias especiales, podía aplicarse una dosis efectiva de hasta 5 mSv a condición de que la dosis efectiva promedio de cinco años consecutivos no excediera de 1 mSv anual). Las NBS de 1996 subrayaban que estos límites de dosis no se aplicaban a las decisiones sobre la conveniencia y la modalidad de una intervención en caso de accidente, en que debería prestarse atención a las dosis proyectadas y a las posibles reducciones de las dosis evitables y las dosis residuales posteriores. Las prescripciones de las NBS de 1996 relacionadas específicamente con las emergencias establecían niveles de intervención genéricos para la adopción de medidas en una emergencia, como la orden de permanecer en espacios interiores, la evacuación y el bloqueo de la glándula tiroides, y niveles de acción genéricos para los alimentos.

Además, en 2002 el OIEA había publicado normas de seguridad que contenían requisitos específicos para la preparación y respuesta frente a una emergencia nuclear o radiológica [69], con inclusión de criterios de dosis para la aplicación de medidas protectoras, como la orden de permanecer en espacios interiores, la evacuación y el bloqueo de la glándula tiroides con yodo. Estas normas establecían requisitos para un adecuado nivel de preparación y respuesta en situaciones de emergencia nuclear o radiológica con el fin de reducir al mínimo las consecuencias de una emergencia, si llegara a producirse (en la sección 3 figura más información a este respecto).

En la época del accidente, las NBS de 1996 se estaban revisando, entre otras cosas, a la luz de las nuevas recomendaciones generales de la ICRP que se habían publicado en 2007 [129]. Justo antes del accidente, la ICRP había publicado recomendaciones específicas sobre la aplicación de sus nuevas recomendaciones para la protección de las personas en situaciones de exposición de emergencia [127] y de los residentes en zonas con contaminación de larga duración después de un accidente nuclear o una emergencia radiológica [197].

Las recomendaciones de la ICRP de 2007 habían revisado el enfoque para hacer frente a las situaciones de exposición de emergencia, incluido el concepto del nivel de referencia para su uso en las estrategias de protección. El nivel de referencia recomendado era una dosis efectiva (ya sea aguda o anual) que podía ser superior a 20 mSv pero no a 100 mSv. Esta debía ser la base para establecer los criterios generales relativos a la adopción de medidas protectoras individuales en las situaciones inhabituales, en muchos casos extremas, en que las medidas tomadas para reducir las exposiciones tuvieran un efecto perturbador, en el entendimiento de que una dosis efectiva que se aproximara a los 100 mSv justificaría casi siempre una medida de protección. Para las etapas de la rehabilitación después de un accidente, el nivel de referencia podía ser superior a 1 mSv, pero sin exceder de 20 mSv. Las nuevas recomendaciones destacaban también que el valor escogido como nivel de referencia dependería de las circunstancias concretas de la exposición de que se tratara.

Este nuevo enfoque se introdujo en las NBS revisadas, que se publicaron en 2014 (en inglés) en la *Colección de Normas de Seguridad* N° GSR Part 3, con el título *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards* [198] (Protección Radiológica y Seguridad de las Fuentes de Radiación: Normas Básicas Internacionales de Seguridad).

Algunas medidas protectoras plantearon grandes dificultades a las autoridades y enormes problemas a las personas y comunidades afectadas [200, 201]. El refugio en albergues y la evacuación fueron particularmente perturbadores para unas 160 000 personas que se vieron aisladas de sus comunidades y solo tenían acceso a artículos limitados para satisfacer sus necesidades cotidianas (figura 4.6 a)). Finalmente esas personas fueron reubicadas, pero sus condiciones de vida normales se vieron gravemente afectadas (figura 4.6 b)). El empleo y la participación en actividades comunitarias eran limitados. Las perspectivas eran inciertas y la planificación para el futuro, muy difícil.



a)

b)

Fig. 4.6. La evacuación inicial creó situaciones de hacinamiento en los albergues. a) Un alto ejecutivo de la TEPCO pide disculpas a los evacuados en un centro de evacuación el 22 de marzo de 2011 (fotografía: cortesía de Koichi Nakamura/AP Images/picturedesk.com); b) las condiciones de vida normales de las personas reubicadas se vieron gravemente afectadas (fotografía: cortesía del Dr Yujiro Kuroda/Universidad Médica).

La población, que ya había sufrido las consecuencias del terremoto y el tsunami, se vio sometida también al estrés físico y psicológico adicional del refugio en albergues, la evacuación y la reubicación. Las restricciones impuestas a los productos de consumo público fueron importantes y necesarias, pero causaron daños económicos y sociales o de reputación a los productores locales.

4.2.2. Restricción de la exposición ocupacional, incluida la de los trabajadores de emergencias

El Japón es Parte en el Convenio sobre la Protección contra las Radiaciones de 1960 (Nº 115), aprobado bajo los auspicios de la OIT [164]. La reglamentación japonesa relativa a la exposición ocupacional era coherente con las recomendaciones y normas internacionales sobre la protección ocupacional. La reglamentación establecía un límite de dosis para la exposición ocupacional, consistente en una dosis efectiva de 20 mSv por año, como promedio quinquenal, y de 50 mSv en cualquier año dado [137]. Para un trabajador de emergencias, un “trabajador que puede sufrir una exposición superior a los límites de dosis ocupacionales durante la aplicación de medidas encaminadas a mitigar las consecuencias de una emergencia para la salud y la seguridad humanas, la calidad de vida, los bienes y el medio ambiente” [48], el criterio límite de la dosis efectiva era de 100 mSv. Este criterio tuvo que ser elevado temporalmente por las autoridades japonesas a un límite de dosis de 250 mSv para los trabajadores de emergencias que se encontraban dentro de un radio de 30 km de la central nuclear de Fukushima Daiichi hasta el 16 de diciembre de 2011 (véase la sección 3.2).

El límite de dosis para la exposición ocupacional en ‘circunstancias especiales’, establecido por las normas internacionales vigentes en el momento del accidente (las NBS de 1996), era de 100 mSv [137]. El límite superior de los niveles de referencia recomendados internacionalmente por la ICRP también era de 100 mSv [129], aunque las recomendaciones indicaban que, en situaciones excepcionales, trabajadores voluntarios debidamente informados podían recibir dosis superiores a este nivel para salvar vidas, prevenir efectos graves en la salud como consecuencia de la radiación o evitar que se produjera una catástrofe. Al fijar el valor de 250 mSv, las autoridades japonesas tuvieron en cuenta recomendaciones anteriores de la ICRP [196, 202] y las prescripciones de las normas de seguridad del

OIEA, que indicaban un valor de orientación de 500 mSv para las personas que participaran en actividades de emergencia, o en operaciones de emergencia encaminadas a evitar el agravamiento de un accidente nuclear. El límite de dosis revisado para los trabajadores de emergencias se estableció mediante la ordenanza de exención del Ministerio de Salud, Trabajo y Bienestar tres días después de la declaración de la emergencia por las autoridades (14 de marzo de 2011). La ordenanza de exención se abolió el 16 de diciembre de 2011 [203].

4.3. EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN

A corto plazo, los factores más importantes que contribuyeron a la exposición de la población fueron: 1) la exposición externa causada por los radionucleidos presentes en el penacho y depositados en la tierra; y 2) la exposición interna de la glándula tiroides, debida a la incorporación de ^{131}I , y la exposición interna de otros órganos y tejidos causada principalmente por la incorporación de ^{134}Cs y ^{137}Cs . A largo plazo, el contribuyente más importante a la exposición de la población será la radiación externa emitida por el ^{137}Cs depositado.

Las primeras evaluaciones de las dosis de radiación se basaron en la monitorización del medio ambiente y en modelos de estimación de las dosis, y en parte dieron valores sobreestimados. En las estimaciones del presente informe se han incluido también los datos de monitorización individual facilitados por las autoridades locales para ofrecer una información más robusta sobre las dosis individuales reales que se recibieron y su distribución. Estas estimaciones indican que las dosis efectivas que recibieron los miembros de la población fueron bajas, comparables en general con el rango de dosis efectivas causadas por los niveles mundiales de radiación natural de fondo.

Después de un accidente nuclear en que hay emisiones de ^{131}I y este es incorporado por los niños, su absorción y las dosis que se acumulan en la glándula tiroides son motivos de particular preocupación. Tras el accidente de Fukushima Daiichi, las dosis equivalentes en la glándula tiroides de los niños sobre las que se informó fueron bajas, porque su incorporación de ^{131}I fue limitada, gracias en parte a las restricciones impuestas al consumo de agua potable y alimentos, incluidas las hortalizas de hoja y la leche fresca. Hay incertidumbres con respecto a las incorporaciones de yodo inmediatamente después del accidente, debido a la escasez de datos fiables de monitorización radiológica individual para ese período.

Al mes de diciembre de 2011, habían participado en operaciones de emergencia alrededor de 23 000 trabajadores de emergencias. Las dosis efectivas de radiación que había recibido la mayoría de ellos estaban por debajo de los límites de dosis ocupacionales vigentes en el Japón. De esas personas, 174 superaban el criterio inicial para los trabajadores de emergencias, y 6 superaban el criterio revisado temporalmente por la autoridad japonesa para la dosis efectiva en una emergencia. Hubo algunas deficiencias en la aplicación de los requisitos de protección radiológica ocupacional, por ejemplo en la monitorización y el registro de las dosis de radiación recibidas por los trabajadores de emergencias en el primer período, en la disponibilidad y utilización de algunos equipos de protección y en la capacitación conexas.

Las dosis estimadas en este informe se basan en las estimaciones de dosis internacionales realizadas por la OMS y el UNSCEAR, que se resumen en el recuadro 4.9. El presente informe también se ha basado en los datos adicionales disponibles, en particular los extraídos del Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima y de las mediciones directas de las dosis recibidas por las personas y de la radiación en el medio ambiente. Estos datos fueron proporcionados por expertos, instituciones, las autoridades locales y el Gobierno del Japón, así como por la TEPCO, y se sometieron a un análisis estadístico.

Las diversas estimaciones diferían porque se realizaron en momentos diferentes y con distintas metodologías. Aunque las estimaciones de la OMS fueron en general más altas que las del UNSCEAR, esto se debió principalmente a que fueron proyecciones de las dosis iniciales, basadas en

los datos muy limitados de que se disponía tras el accidente. Las estimaciones de las dosis recibidas por la población que efectuaron la OMS y el UNSCEAR se vieron limitadas por la reducida disponibilidad de mediciones directas de las dosis individuales recibidas por las personas y se realizaron principalmente utilizando modelos de evaluación de dosis basados en las condiciones medioambientales. Aunque las diferencias dificultan una comparación detallada, las estimaciones del presente informe y las de la OMS y el UNSCEAR son básicamente coherentes en su indicación de que las dosis fueron en general inferiores a los niveles de referencia establecidos en las recomendaciones y normas internacionales.

Recuadro 4.9. Estimaciones de dosis realizadas por la OMS en 2012 [146] y por el UNSCEAR en 2014 [148]

En 2012, la Organización Mundial de la Salud (OMS) publicó una primera evaluación de la exposición a la radiación causada por el accidente, en que se daba una estimación inicial de las dosis de radiación recibidas por los miembros típicos de la población efectuada aplicando técnicas de modelización a la información hecha pública por las instituciones gubernamentales y reunida hasta septiembre de 2011. En esa época, los datos necesarios para realizar una evaluación completa no existían o eran insuficientes. Se utilizaron varios supuestos prudentes que pueden haber dado lugar a la sobreestimación de algunas dosis. Por ejemplo, se aplicaron supuestos prudentes a fin de reducir al mínimo la posibilidad de subestimar los posibles riesgos para la salud en relación con las medidas protectoras y el consumo de alimentos. Aun así, la evaluación mostró que la dosis efectiva total recibida típicamente por los miembros de la población en dos lugares de exposición relativamente alta de la prefectura de Fukushima durante el primer año después del accidente se situó dentro de una banda de valores de 10 a 50 mSv. En esos lugares más afectados, la exposición externa fue el principal elemento que contribuyó a la dosis efectiva. En el resto de la prefectura de Fukushima, se estimó que la dosis efectiva se había situado en una banda de valores de 1 a 10 mSv. Las estimaciones indicaron también que en la mayor parte del Japón las dosis efectivas no habían sobrepasado la banda de 0,1 a 1 mSv, mientras que en el resto del mundo las dosis efectivas no habían llegado a 0,01 mSv y habían sido, por lo general, muy inferiores a ese nivel.

En 2014, el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) publicó un informe sobre el accidente que incluía las dosis evaluadas para los trabajadores y la población. Las estimaciones de las dosis efectivas externas recibidas por los miembros de la población se habían basado en la información disponible sobre la densidad de deposición del ¹³⁷Cs en diferentes zonas en función del tiempo, y en la localización y los patrones de desplazamiento estimados de la población. Las estimaciones del UNSCEAR indicaron que, en las zonas evacuadas con los valores medios más altos, la dosis efectiva recibida por los adultos antes de la evacuación y durante esta fue, por término medio, inferior a 10 mSv, y que, en el caso de las personas evacuadas más temprano, la dosis fue de alrededor de la mitad de ese nivel. Se estimó que los adultos que vivían en la ciudad de Fukushima habían recibido, en promedio, una dosis efectiva de aproximadamente 4 mSv en el primer año después del accidente; las dosis efectivas estimadas para los niños de un año de edad eran de alrededor del doble de ese valor.

En cuanto a las personas que vivían en otras zonas de la prefectura de Fukushima y en las prefecturas vecinas, se estimó que habían recibido dosis efectivas comparables o menores; en el resto del Japón las dosis efectivas habían sido aún más bajas. Las dosis efectivas atribuibles al accidente que podrían recibir a lo largo de toda la vida las personas que sigan viviendo en la prefectura de Fukushima serían, según las estimaciones del UNSCEAR, de poco más de 10 mSv por término medio. Las exposiciones a la radiación causadas por el accidente en los Estados vecinos y en el resto del mundo fueron muy inferiores a las que se registraron en el Japón; las dosis efectivas no llegaron a 0,01 mSv. Sin embargo, el UNSCEAR destacó que había variaciones considerables entre las personas en torno a este valor, en función del lugar en que se encontraban y de los alimentos que habían consumido.

Nota: Como se indicó en el recuadro 4.3, las dosis mundiales de radiación de fondo natural comunicadas por el UNSCEAR representan una dosis promedio anual de 2,4 mSv (lo que supone una dosis total acumulada a lo largo de la vida de aproximadamente 170 mSv), con un rango típico de 1 a 13 mSv, y con grandes grupos de población expuestos a dosis de radiación de fondo natural de entre 10 y 20 mSv.

4.3.1. Exposición de la población

Exposición externa

El enfoque inicial para estimar las dosis efectivas recibidas por los miembros de la población debido a la exposición externa se basó principalmente en los datos de las mediciones medioambientales de las tasas de dosis equivalente ambiental, y en cálculos y estudios de los lugares y los comportamientos personales. Los datos utilizados abarcaron amplias mediciones de dosis equivalentes ambientales, hechas, entre otras cosas, mediante instrumentación montada en vehículos.

El NIRS estimó las dosis efectivas por exposición externa recibidas por las personas que habían respondido a los cuestionarios del Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima en los cuatro meses siguientes al accidente nuclear [204]. Las estimaciones se basaron en los desplazamientos declarados de las personas y los niveles de radiación pertinentes en los entornos locales.

Se han publicado diversas estimaciones de las dosis efectivas recibidas por las personas por exposición externa en los cuatro primeros meses [205 a 208]. Por ejemplo, en el área de Soso⁹⁴ (que incluye la ‘zona de evacuación’ y la ‘Zona de Evacuación Deliberada’) esas dosis fueron inferiores a 5 mSv para el 98,7 % de los residentes (con una dosis efectiva máxima de 25 mSv). En la prefectura de Fukushima en su conjunto, incluidas la zona de evacuación y la Zona de Evacuación Deliberada, las dosis fueron inferiores a 3 mSv para el 99,4 % de los residentes encuestados [208].

Para el presente informe se realizó un análisis estadístico de dosis efectivas individuales debidas a la radiación externa en diversos municipios de la prefectura de Fukushima que había estimado el NIRS, utilizando los datos del Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima para el período comprendido entre el 11 de marzo y el 11 de julio de 2011 (y excluyendo la dosis efectiva debida a la exposición externa a la radiación natural de fondo). En la figura 4.7 se presentan los resultados de este análisis para los municipios situados dentro del radio de 20 km, y para otros que se encuentran fuera de esa zona. Esta figura ilustra el hecho de que las dosis externas recibidas en los cuatro primeros meses fueron, en promedio, inferiores entre las poblaciones de la zona situada en un radio de 20 km a las de los lugares de fuera de ella, como consecuencia de la temprana evacuación de esa zona. Los resultados dentro de la zona situada en un radio de 20 km tienden a arrojar distribuciones más amplias que los de los lugares situados fuera de ella. Esto se debe a la evacuación de miembros de una misma comunidad a diferentes lugares y a menudo a otros desplazamientos que dan lugar a diferencias en las dosis recibidas. El NIRS elaboró modelos de esta complicada pauta utilizando 18 escenarios de evacuación.

Hay incertidumbres relacionadas con el uso de las entrevistas con los residentes, las mediciones medioambientales y los modelos de estimación de dosis para determinar las dosis recibidas por la población. La monitorización radiológica personal de los miembros de la población es, pues, fundamental para efectuar una reconstrucción fiable de las dosis de radiación.

La corroboración más importante de las dosis individuales recibidas por la radiación externa provino de los datos de la monitorización individual realizada con dosímetros personales. Cuando se dispuso de esos datos se pudo efectuar una comparación entre los dos enfoques diferentes: la utilización de

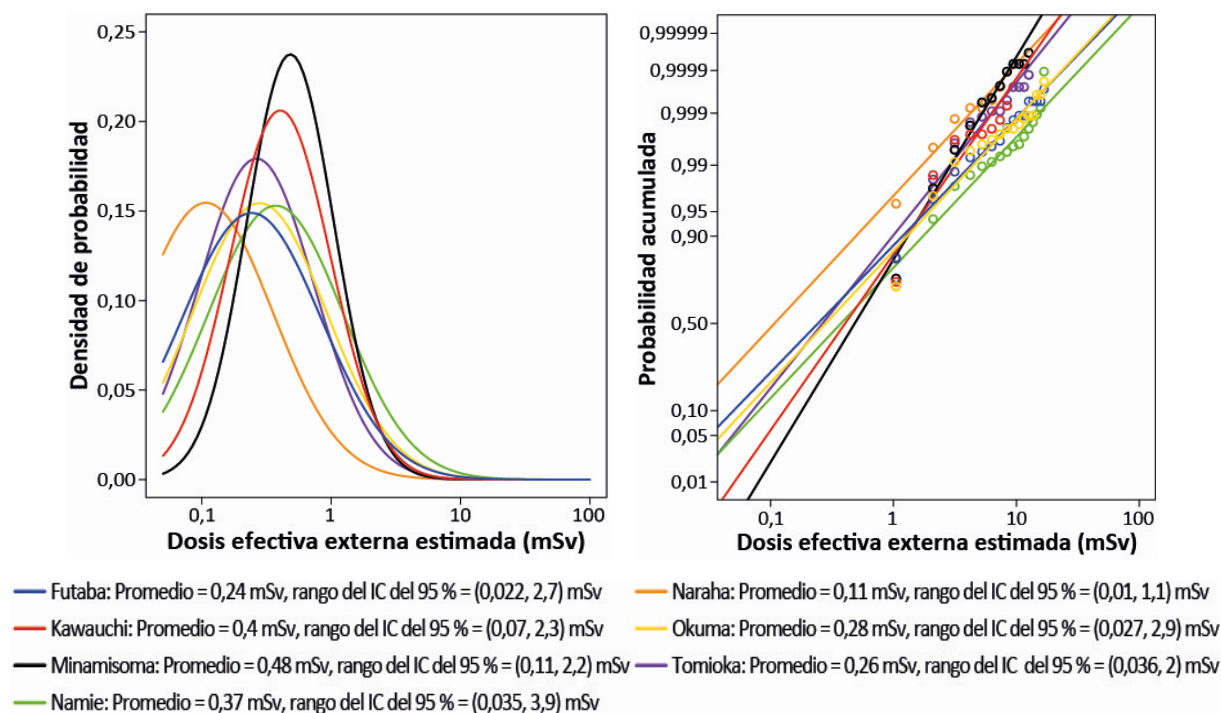
⁹⁴ Un área de la parte oriental de la prefectura de Fukushima integrada por la ciudad de Soma, la ciudad de Minamisoma, el pueblo de Hirono, el pueblo de Naraha, el pueblo de Tomioka, la aldea de Kawauchi, el pueblo de Okuma, el pueblo de Futaba, la aldea de Katsurao, el pueblo de Namie, el pueblo de Shinti y la aldea de Iitate, muchos de los cuales se hallaban dentro de la ‘zona de evacuación’ o la ‘Zona de Evacuación Deliberada’ designadas.

supuestos sobre los hábitos y modelos de las personas para estimar la *dosis efectiva* recibida, frente a la monitorización de las *dosis equivalentes personales* reales⁹⁵.

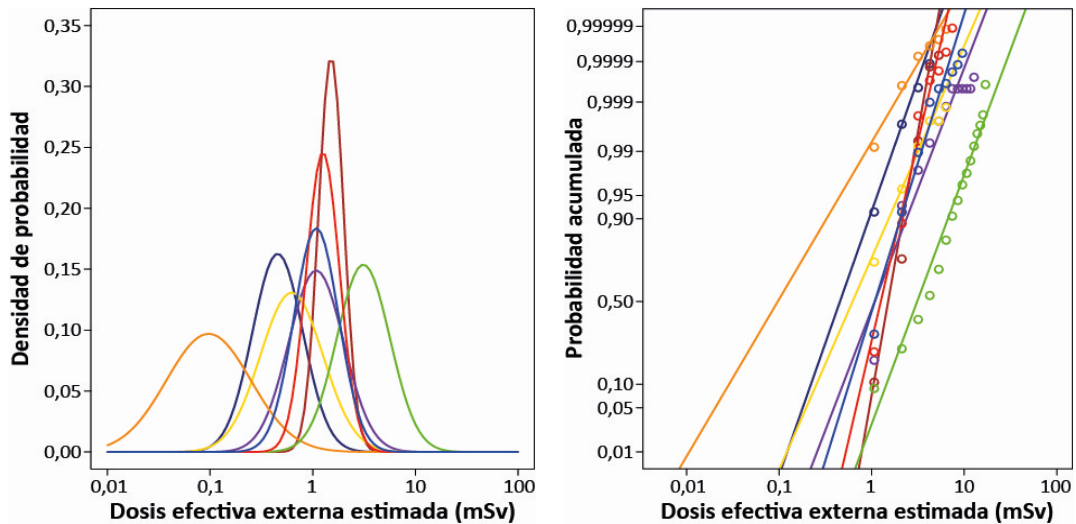
Los resultados indicaron que las dosis realmente recibidas, según las mediciones de los monitores personales, habían sido en general inferiores a las estimadas con ayuda de los cuestionarios y la modelización. En la figura 4.8 se presenta un ejemplo de esta comparación, llevada a cabo por una administración local. Este ejemplo muestra que las dosis obtenidas por modelización son en general sobreestimaciones de las dosis realmente recibidas (esto se observó también en las evaluaciones de las dosis tras el accidente de Chernóbil [169]).

La gran cantidad de información proporcionada al OIEA por el Japón comprendía datos de dosis equivalentes personales y resultados de mediciones de conteo de cuerpo entero.

Esta información se había registrado en diferentes momentos, y por períodos diferentes, utilizando técnicas de medición distintas, y se habían realizado mediciones en muchas zonas afectadas, pero no en todas. El elemento en común de estos datos es que todas las dosis equivalentes personales eran bajas (las dosis efectivas comprometidas estimadas a partir del conteo de cuerpo entero eran insignificantes, como se puede ver más abajo), lo que daba niveles de dosis efectivas comparables con los niveles típicos de la dosis efectiva de fondo.



⁹⁵ La cantidad utilizada para la monitorización individual, la *dosis equivalente personal*, es un indicador indirecto de la cantidad de la *dosis efectiva*.



- Date: Promedio = 1,1 mSv, rango del IC del 95 % = (0,41, 2,9) mSv
- Fukushima: Promedio = 1,3 mSv, rango del IC del 95 % = (0,6, 2,6) mSv
- Iitate: Promedio = 3,1 mSv, rango del IC del 95 % = (0,96, 10) mSv
- Iwaki: Promedio = 0,097 mSv, rango del IC del 95 % = (0,015, 0,62) mSv
- Katsurao: Promedio = 0,62 mSv, rango del IC del 95 % = (0,16, 2,5) mSv
- Kawamata: Promedio = 1,1 mSv, rango del IC del 95 % = (0,32, 3,6) mSv
- Nihonmatsu: Promedio = 1,5 mSv, rango del IC del 95 % = (0,87, 2,6) mSv
- Tamura: Promedio = 0,46 mSv, rango del IC del 95 % = (0,15, 1,4) mSv

Fig. 4.7. Distribución log-normal normalizada idealizada de la densidad de probabilidad y la probabilidad acumulada de las dosis efectivas externas estimadas en diversas ciudades, pueblos y aldeas de la prefectura de Fukushima para los cuatro meses siguientes al accidente, sobre la base de los datos del Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima. La parte superior de la figura presenta el análisis relativo a los lugares situados en un radio de 20 km (véase la sección 3) y la parte inferior se refiere a los lugares situados fuera de esa zona. La leyenda bajo los gráficos indica las dosis medias y el intervalo de confianza del 95 % para esos lugares. En los datos originales todas las dosis inferiores a 1 mSv estaban acumuladas en la clase de 1 mSv.

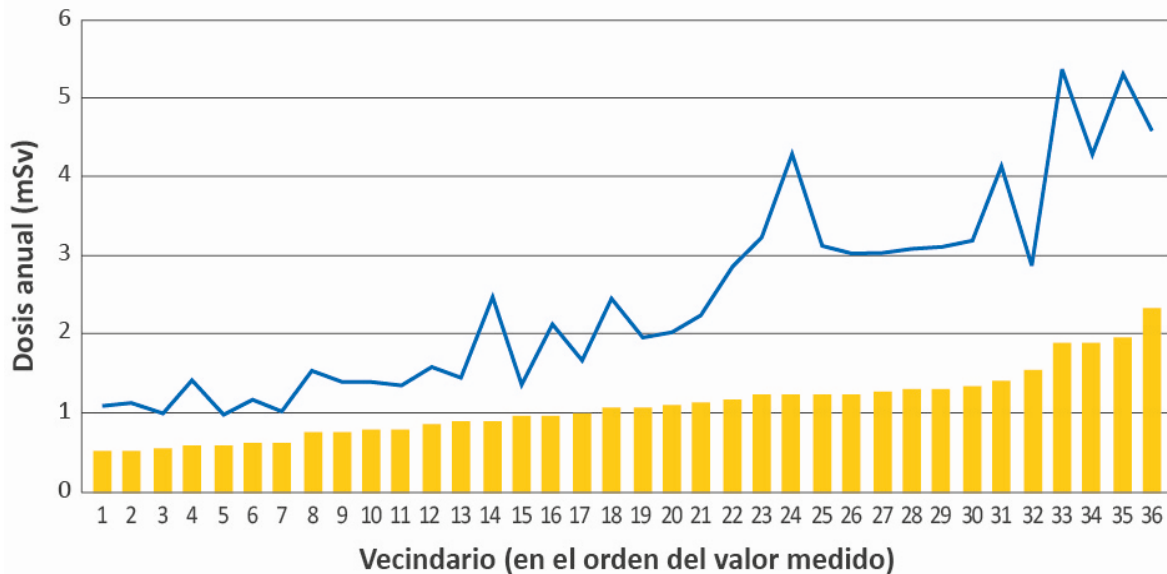
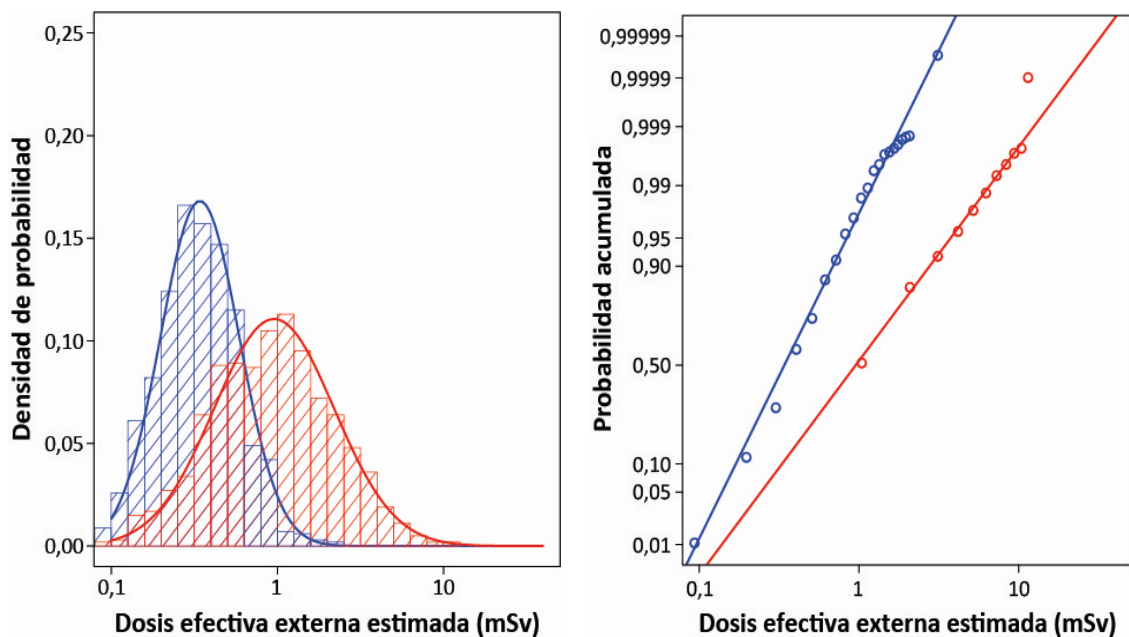


Fig. 4.8. Comparación de las estimaciones de las dosis individuales externas con las mediciones en una ciudad afectada representativa entre julio de 2012 y junio de 2013. Las dosis efectivas se evaluaron por estimación (línea), suponiendo 16 horas de permanencia y blindaje en espacios interiores y 8 horas pasadas en el exterior; y por monitorización individual (barras) de la dosis equivalente personal, en diversos vecindarios de la ciudad (numerados) [209].



- Ciudad 1: Promedio = 0,95 mSv, rango del IC del 95 % = (0,19, 4,9) mSv
- Ciudad 2: Promedio = 0,34 mSv, rango del IC del 95 % = (0,12, 1) mSv

Fig. 4.9. Distribución de probabilidad de las dosis equivalentes personales monitorizadas de los miembros de la población durante 2011 proporcionadas por el Gobierno del Japón para dos municipios de la zona afectada respecto de los cuales se disponía de datos anualizados. Para el municipio 1, la distribución de la densidad de probabilidad normalizada idealizada se ilustra en rojo; para el municipio 2, la densidad de probabilidad normalizada idealizada se ilustra en azul; en ambos casos, se da la distribución de probabilidad acumulada (véase el recuadro 4.6). La distribución muestra que las dosis equivalentes personales son bajas, con promedios inferiores a 1 mSv por año, lo que permite concluir, con un nivel de confianza del 95 %, que las personas que recibieron dosis efectivas en estos municipios recibieron menos de 5 mSv.

En la figura 4.9 se ilustra este análisis respecto de dos municipios de las zonas afectadas para los que se disponía de información anualizada. El análisis reconfirmó que las dosis equivalentes personales anuales habían sido bajas, con dosis efectivas medias inferiores a 1 mSv por año, lo que permitió concluir, con un nivel de confianza del 95 %, que las personas habían recibido dosis efectivas inferiores a 5 mSv.

Exposición interna

El NIRS, el JAEA y otras organizaciones del Japón realizaron mediciones de la incorporación de radionucleidos mediante el conteo de cuerpo entero.

Tras el accidente, se monitorizó a más de 200 000 residentes en distintos lugares de la prefectura de Fukushima. Los niveles eran, en general, inferiores a los límites de detección sumamente bajos de los contadores de cuerpo entero, lo que indicó que la incorporación de radionucleidos al organismo había sido escasa o nula. Por consiguiente, no fue posible, ni necesario, realizar un análisis estadístico detallado de esos datos.

Cuando fue posible convertir la incorporación medida en dosis efectivas, formulando supuestos con respecto al momento y la naturaleza de la incorporación, la vasta mayoría de las estimaciones de la dosis efectiva comprometida fueron inferiores a 1 mSv [210]. Según los informes, el compromiso de dosis efectiva estimado a partir de las mediciones de conteo de cuerpo entero del ^{134}Cs y el ^{137}Cs fue inferior a 1 mSv aproximadamente en el 99 % de los residentes [206].

Muchas de las mediciones de conteo de cuerpo entero se realizaron varios meses después del accidente [211, 212] y por lo tanto solo se aplican, en muchos casos, al ^{134}Cs y el ^{137}Cs , debido al breve período de semidesintegración del ^{131}I . Dada la importancia de la incorporación de ^{131}I tanto por

inhalación como por ingestión en el primer mes después del accidente, esto dificulta la evaluación de la exposición interna. Sin embargo, se pudo detectar ^{131}I en las mediciones de los evacuados y las personas que habían visitado brevemente la prefectura de Fukushima realizadas en la Universidad de Nagasaki [213]. La dosis estimada más alta de absorción en la glándula tiroides fue de 20 mGy (lo que representa una dosis equivalente en la tiroides de 20 mSv), con una dosis efectiva correspondiente de alrededor de 1 mSv.

Las dosis internas recibidas en el período inicial dependieron de que las personas ingirieran alimentos producidos localmente o alimentos procedentes de otras partes y de que bebieran o no agua del grifo en los primeros días, antes de que se hubieran establecido plenamente las restricciones. Según las encuestas sobre las cestas de la compra, la exposición causada por el consumo de leche, alimentos y agua fue muy baja, ya que no se distribuyeron productos alimenticios ni leche de producción local en los albergues y solo se utilizó agua embotellada para beber y elaborar los preparados para lactantes.

La exposición por ingesta de hortalizas fue baja, porque el consumo de hortalizas producidas localmente al aire libre fue muy escaso o nulo (debido a que era el comienzo de la primavera y no había empezado el período vegetativo). De hecho, las únicas hortalizas de producción local que se consumieron fueron las cultivadas en invernaderos, que no estaban contaminadas.

Dosis en la glándula tiroides de los niños

Después de un accidente nuclear en que se producen emisiones sustanciales de ^{131}I , las dosis recibidas por la glándula tiroides de los niños son una preocupación de salud pública importante. La principal vía potencial de incorporación de las dosis recibidas por la tiroides en los niños suele ser la ingestión de leche que contiene ^{131}I .

Sin embargo, debido a varios factores, la incorporación típica de ^{131}I a través de la leche de vaca fue muy baja después del accidente. Las prácticas de manejo del ganado lechero en el Japón, como el hecho de que estuviera en general estabulado, evitaron la ingestión de ^{131}I por las vacas lecheras. La ingestión de ^{131}I a través de la leche se vio limitada también por la contribución relativamente baja de la leche a la alimentación de los lactantes y por las estrictas restricciones impuestas por las autoridades al consumo de leche después del accidente. Aunque había otras vías de ingestión de ^{131}I , como el consumo de hortalizas de hoja y de agua potable, en especial en el período inmediatamente posterior a la emisión, las prontas restricciones impuestas con respecto al consumo de agua potable y alimentos limitaron la incorporación por estas vías.

Debido a estos factores, es probable que la incorporación de ^{131}I en el organismo de los niños haya sido baja, y atribuible principalmente a la inhalación. Sin embargo, había incertidumbres asociadas con las estimaciones de la incorporación de ^{131}I y de las dosis equivalentes en la tiroides de los niños en los primeros días después del accidente.

Las dosis equivalentes en la tiroides de los niños se estimaron monitorizando los niveles de radiación externa causados por la actividad del ^{131}I en la glándula. Estos niveles se midieron en la piel, cerca de la tiroides, de los niños procedentes de las zonas en que se habían predicho dosis altas en esta glándula. Se ha comunicado un número reducido de mediciones directas de este tipo para las semanas siguientes al accidente. En la figura 4.10 [214] se resumen los resultados de un estudio en que se efectuaron 1080 mediciones en niños de 1 a 15 años de edad en la ciudad de Iwaki, el pueblo de Kawamata y la aldea de Iitate entre el 26 y el 30 de marzo de 2011.

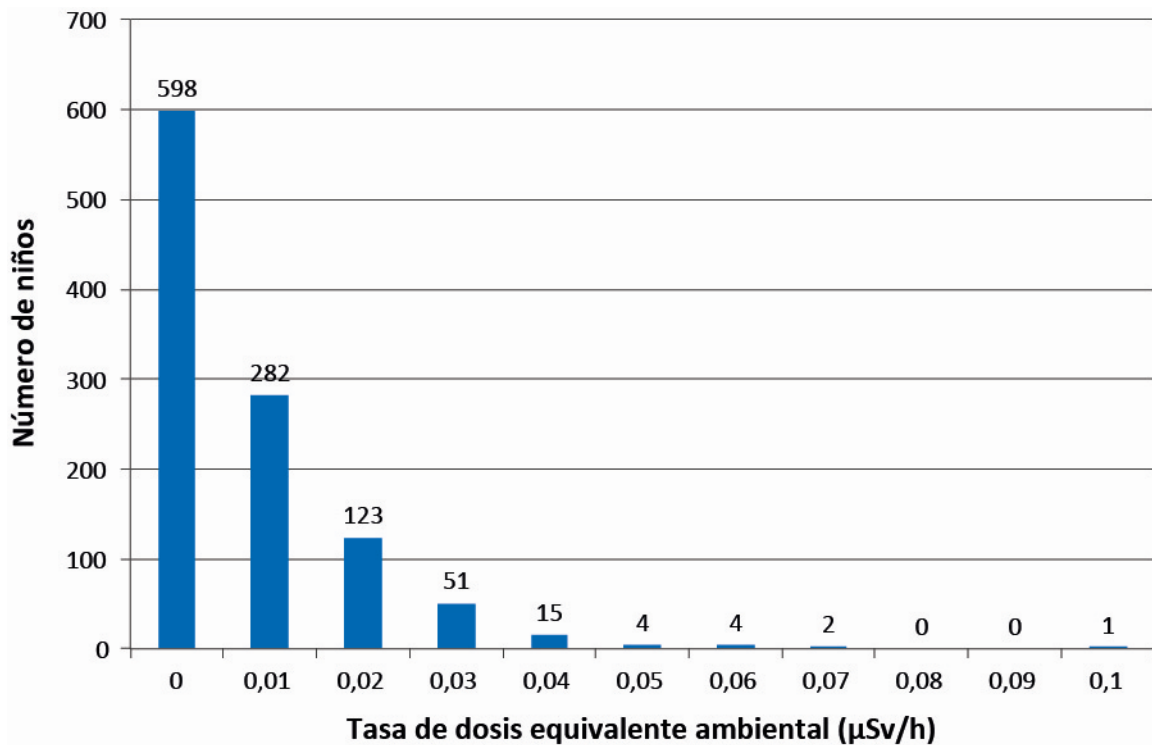


Fig. 4.10. Distribución del valor neto de la tasa de dosis medida en la glándula tiroides estimado sustrayendo el valor de fondo del valor de la lectura [214], es decir, de las tasas de dosis equivalentes ambientales netas en la glándula tiroides, en 1080 niños de entre 0 y 15 años de edad. En el caso del 99 % de los niños monitorizados, la tasa de dosis equivalente ambiental medida cerca de la tiroides fue de 0,000 04 mSv por hora o menos, lo que corresponde a una dosis equivalente en la tiroides de unos 20 mSv o menos.

La tasa de dosis equivalente ambiental más alta medida cerca de la tiroides de un niño de un año de edad fue de 0,0001 mSv por hora, lo que sería compatible con una dosis absorbida en la tiroides de aproximadamente 50 mGy (una dosis equivalente en la tiroides de 50 mSv). Se informó de que las dosis equivalentes en la tiroides determinadas en marzo de 2011 con un detector de centelleo de NaI (TI) en los niños de la zona de evacuación y las ‘Zonas de Evacuación Deliberada’ habían sido inferiores a 10 mSv aproximadamente en el 95,7 % de los niños (con un máximo de 43 mSv) [214]. Es probable que todas las dosis fueran inferiores al valor de intervención genérico optimizado para la profilaxis con yodo de 100 mGy de dosis absorbida comprometida evitable en la tiroides debida al yodo radiactivo, establecido en las NBS de 1996 [137]. También fueron inferiores a la dosis proyectada de 50 mSv en los primeros siete días para el bloqueo de la tiroides con yodo establecida en las NBS revisadas [198] como criterio genérico para la adopción de medidas protectoras y de otras medidas de respuesta en situaciones de exposición de emergencia a fin de reducir el riesgo de efectos estocásticos. A título comparativo, las dosis absorbidas por la tiroides de los niños después del accidente de Chernóbil llegaron a varios miles de mGy [169, 178], entre casi 100 a 1000 veces más.

4.3.2. Exposición ocupacional

Tras el accidente, los trabajadores de emergencias del emplazamiento se vieron sometidos de inmediato a condiciones de trabajo extremadamente duras y a niveles de radiación muy altos al tratar de estabilizar los reactores. En el período comprendido entre marzo de 2011 y marzo de 2012, 174 de los aproximadamente 23 000 trabajadores en el emplazamiento superaron el criterio inicial para la dosis efectiva en una emergencia de 100 mSv, y de ellos seis sobrepasaron el criterio para la dosis efectiva (revisado temporalmente) en una emergencia de 250 mSv. Ningún trabajador sobrepasó una

dosis efectiva de 100 mSv en los años siguientes. Un trabajador⁹⁶ superó el límite de dosis efectiva efectiva anual ocupacional de 50 mSv en el período de abril de 2012 a marzo de 2013 [203]. En la figura 4.11 se presenta la comparación de las dosis efectivas recibidas por los trabajadores de emergencias en la central nuclear de Fukushima Daiichi entre marzo de 2011 y octubre de 2014.

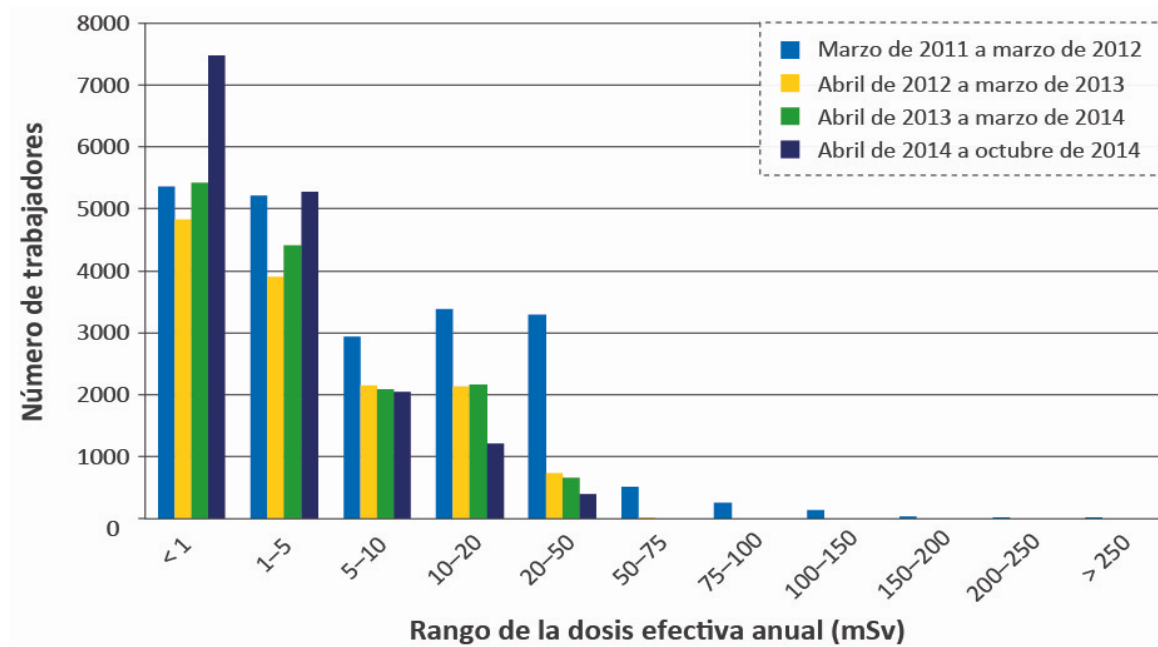


Fig. 4.11. Comparación de la dosis efectiva recibida por los trabajadores de emergencias en la central nuclear de Fukushima Daiichi entre marzo de 2011 y octubre de 2014 (empleados de la TEPCO y contratistas). Durante el año siguiente al accidente se registraron altas dosis efectivas. En 2012, las dosis efectivas recibidas por los trabajadores ya eran bajas, comparables a las de las situaciones de funcionamiento normal [215].

⁹⁶ Este trabajador se clasificó en la categoría de las personas expuestas al límite de dosis en emergencias de 100 mSv, en lugar del límite de dosis ocupacional de 50 mSv por año.

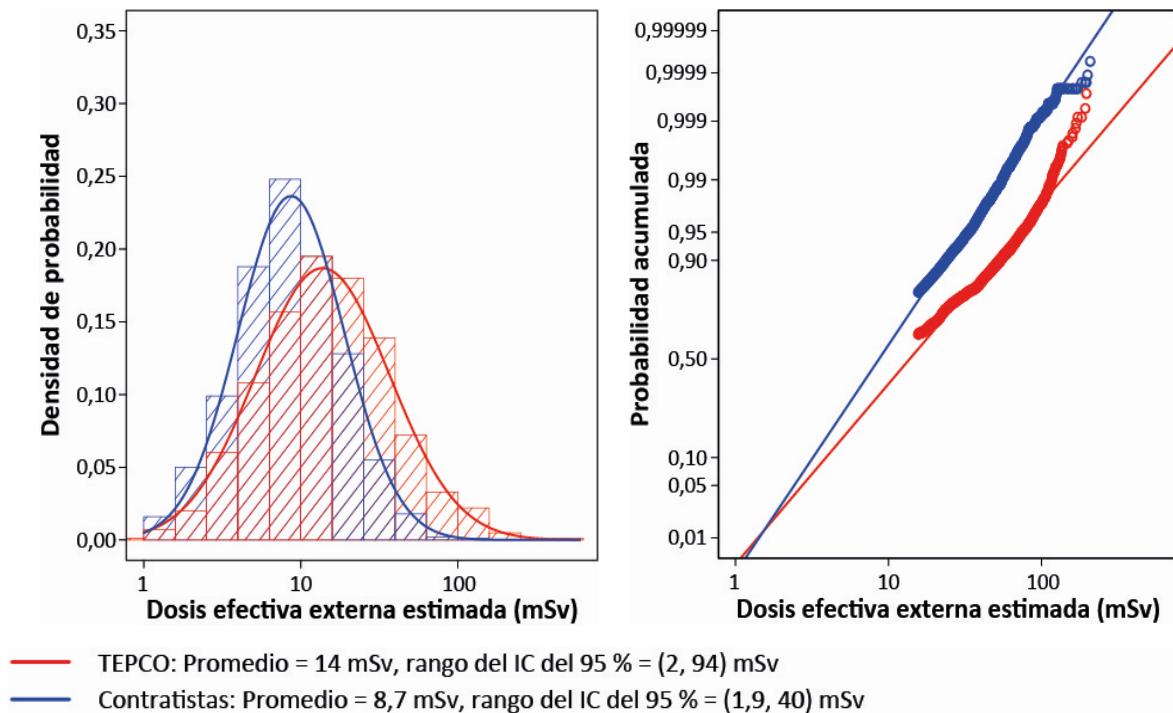


Fig. 4.12. Distribución normalizada idealizada de la densidad de probabilidad y de la probabilidad acumulada (véase el recuadro 4.6) de la dosis equivalente personal monitorizada en los trabajadores de la TEPCO y los trabajadores contratados en 2011. Las dosis correspondientes a los trabajadores de la TEPCO fueron en general superiores a las de los trabajadores contratados, porque los empleados de la TEPCO trabajaron en zonas con dosis más altas [215].

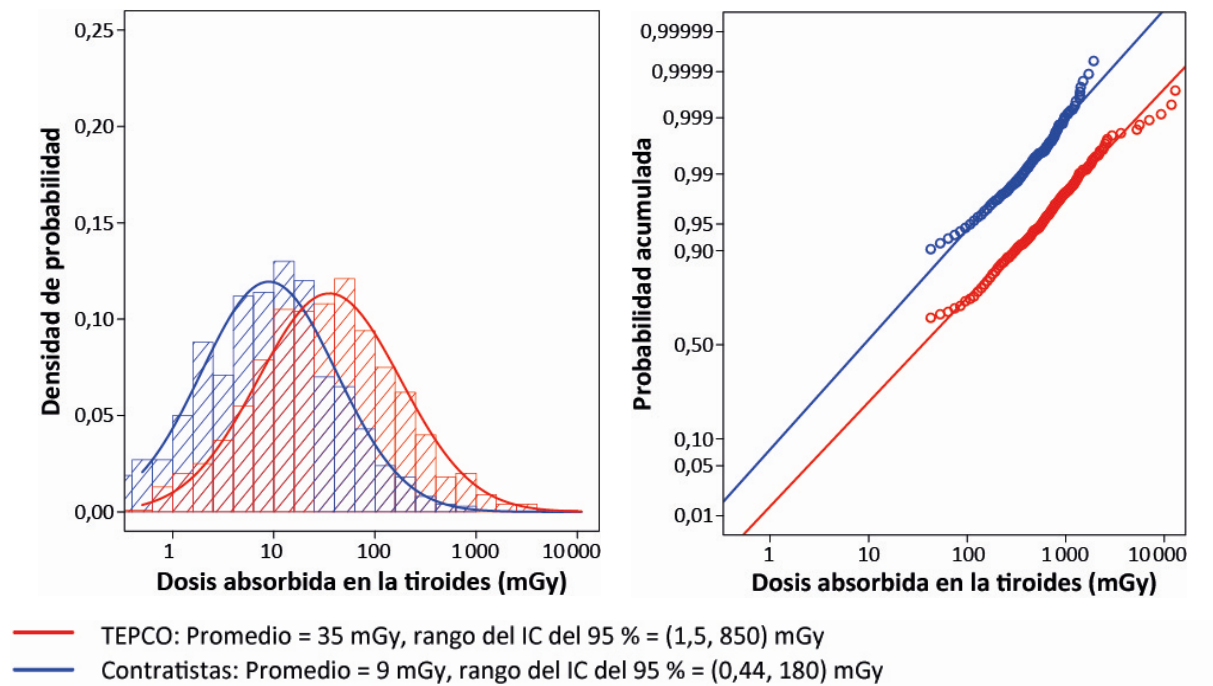
La TEPCO presentó los valores de las dosis equivalentes personales recibidas por sus empleados y por los trabajadores contratados, y esos valores se sometieron a un análisis estadístico. Los resultados se presentan en la figura 4.12.

En la primera fase, el principal factor que contribuyó a las dosis efectivas, en particular a las recibidas por los seis trabajadores de emergencias del emplazamiento que superaron el criterio de dosis revisado temporalmente para ese tipo de trabajadores, fue la exposición interna causada por la incorporación de radionucleidos en el organismo. Esto se debió a los retos asociados con las difíciles condiciones de trabajo que rigieron durante la emergencia, la utilización incorrecta de los respiradores y la insuficiente capacitación.

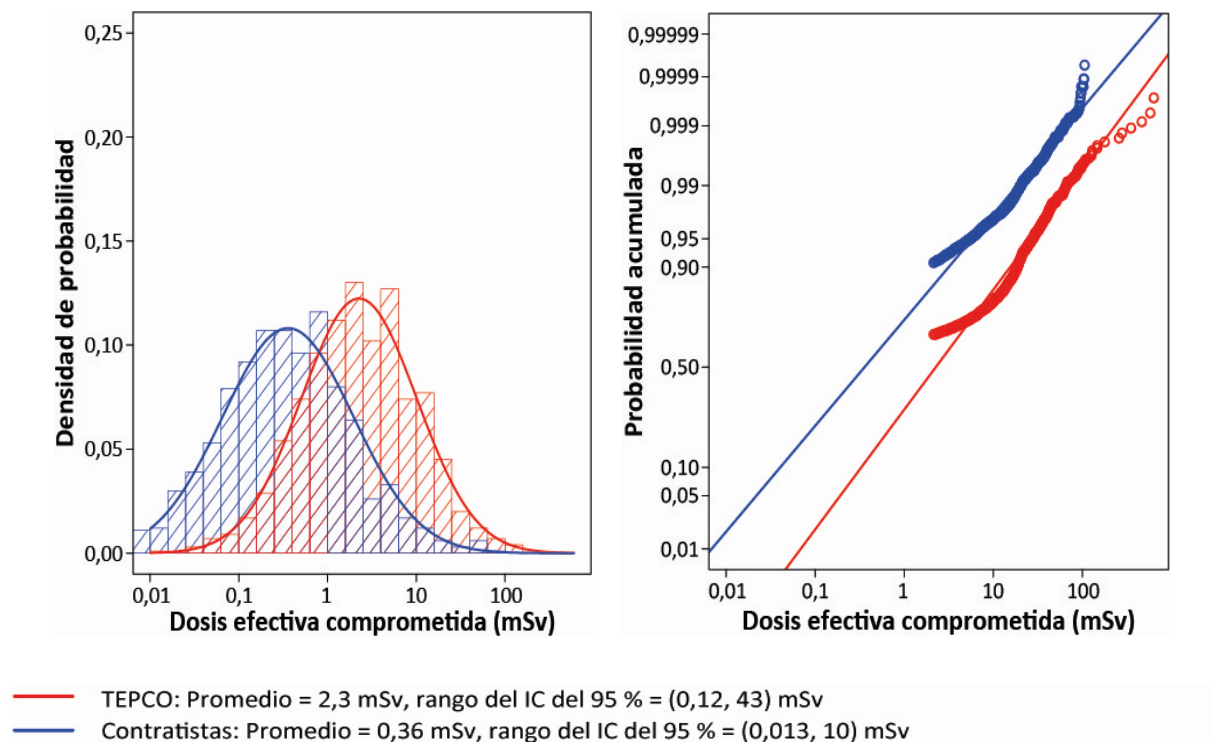
Las dosis internas fueron en su mayor parte dosis equivalentes en la tiroides causadas por la inhalación de ^{131}I . Aunque las dosis equivalentes en la tiroides fueron inferiores a 100 mSv para la mayoría de los trabajadores de la central nuclear de Fukushima Daiichi, en el caso de 1757 de ellos las dosis equivalentes en la tiroides fueron superiores a este nivel, en el de 17 superaron los 2000 mSv y en dos personas excedieron de 12 000 mSv [216].

Hay varias incertidumbres asociadas a las estimaciones de las dosis de radiación de los trabajadores debidas a la exposición interna, especialmente de las dosis equivalentes en la tiroides. Entre otras cosas, el escenario que se supuso para la incorporación de radionucleidos en el organismo (por ejemplo, el momento en que se produjo) es crucial para la estimación de la dosis interna. Además hubo cierto retraso en la realización de las mediciones en la tiroides, debido a las operaciones de emergencia y a las condiciones generales imperantes después del accidente. El Ministerio de Salud, Trabajo y Bienestar llevó a cabo una reevaluación de la dosis efectiva comprometida de los trabajadores de emergencias. El Ministerio ha promovido la normalización de las metodologías de evaluación prudente de la dosis interna a fin de evitar, en la medida que fuera razonablemente posible, las subestimaciones de las dosis recibidas [217].

En la figura 4.13 se presenta el análisis estadístico de la distribución de las dosis absorbidas en la tiroides notificadas y de las dosis efectivas comprometidas estimadas debidas a la exposición interna.



a)



b)

Fig. 4.13. Distribución normalizada idealizada de la densidad de probabilidad y de la probabilidad acumulada de las dosis internas (véase el recuadro 4.6). a) Dosis absorbida en la tiroides; y b) dosis efectiva comprometida consiguiente. La distribución superior a lo previsto en las dosis más bajas puede significar que se asignaron dosis equivalentes al nivel de detección a todas las personas sin radiactividad detectable [215].

La exposición ocupacional de los trabajadores del emplazamiento es coherente con los resultados del UNSCEAR. Las revaluaciones de las dosis recibidas por los trabajadores de la TEPCO y los contratistas, de las que se dispuso tras la publicación del informe del UNSCEAR, se utilizaron en el análisis estadístico de las dosis en el presente informe y redujeron las incertidumbres. Persisten algunas incertidumbres acerca de las dosis causadas por los radionucleidos de período corto, la influencia del alto nivel de radiación de fondo en las primeras mediciones por conteo de cuerpo entero, los retrasos en las mediciones de la tiroides y la suficiencia de la información sobre las biovaloraciones. Organizaciones del Japón están trabajando para reducir aún más las incertidumbres en la evaluación de la dosis ocupacional, específicamente en las evaluaciones de la exposición interna (véase, por ejemplo, la referencia [218]).

Los bomberos, los agentes de policía y el personal de la Fuerza de Autodefensa del Japón también participaron en una serie de actividades de emergencia en el emplazamiento (véase la sección 3). Ningún miembro de este grupo recibió una dosis efectiva superior a 100 mSv, y la mayoría recibió dosis efectivas de menos de 10 mSv. De más de 8000 empleados que trabajaron fuera del emplazamiento y sobre los que se dispuso de información dosimétrica, cinco recibieron dosis efectivas superiores a 10 mSv pero inferiores a 20 mSv. La dosis efectiva máxima registrada entre los miembros de la policía que trabajaron fuera del emplazamiento fue de 5 mSv aproximadamente.

Hubo personal de otros países que ayudó en la emergencia. Los datos disponibles muestran que, entre las personas procedentes de los Estados Unidos de América que prestaron asistencia o realizaron monitorizaciones medioambientales en la zona de Fukushima, la dosis efectiva máxima recibida fue de 0,12 mSv en el caso del personal militar y de 0,068 mSv en el del personal del Departamento de Energía de los Estados Unidos [219], ambas por debajo de los límites reglamentarios. Entre los funcionarios del OIEA que participaron en la monitorización medioambiental y prestaron asesoramiento sobre la protección y la seguridad, la dosis efectiva media fue de alrededor de 0,5 mSv, y un funcionario recibió una dosis efectiva de aproximadamente 2,5 mSv por exposición externa.

4.4. EFECTOS EN LA SALUD

No se observó ningún efecto temprano de la radiación en la salud de los trabajadores o de los miembros de la población que pudiera atribuirse al accidente.

El tiempo de latencia de los efectos tardíos de la radiación en la salud puede ser de decenios, por lo que no es posible descartar, mediante observaciones hechas pocos años después de la exposición, que esos efectos se produzcan en algún momento en la población expuesta. Sin embargo, dados los bajos niveles de dosis notificados con respecto a la población, las conclusiones del presente informe concuerdan con las comunicadas por el UNSCEAR a la Asamblea General de las Naciones Unidas. El UNSCEAR determinó que “no se prevé un aumento discernible de la incidencia de efectos en la salud relacionados con la radiación entre la población general expuesta y su descendencia” (señalada en el contexto de las repercusiones en la salud relacionadas con los “niveles y efectos de la exposición a la radiación debida al accidente nuclear tras el sismo y tsunami de gran magnitud ocurridos en la zona oriental del Japón en 2011”) [148]. Con respecto al grupo de trabajadores que recibieron dosis efectivas de 100 mSv o superiores, el UNSCEAR concluyó que “cabría esperar un mayor riesgo de cáncer en el futuro. Sin embargo, no se prevé un aumento perceptible de la incidencia de cáncer en ese grupo a causa de la dificultad de confirmar una incidencia tan reducida en comparación con las fluctuaciones estadísticas normales de la incidencia de cáncer” [148].

El Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima se emprendió para monitorizar la salud de la población afectada de la prefectura de Fukushima. Este estudio tiene por objeto detectar y tratar precozmente las enfermedades, y también prevenir las enfermedades relacionadas con el modo de vida. Mientras se prepara el presente informe, está en curso una exploración intensiva de la glándula tiroides de los niños en el marco de ese estudio. Se está empleando equipo de alta sensibilidad, que ha detectado anomalías asintomáticas de la tiroides (que no se habrían detectado

por medios clínicos) en un número importante de niños examinados. Es poco probable que las anomalías encontradas en el estudio estén asociadas con la exposición a la radiación causada por el accidente; lo más probable es que denoten la prevalencia normal de anomalías de la tiroides en los niños de esa edad. El cáncer de tiroides en los niños es el efecto en la salud más probable tras un accidente con emisiones importantes de yodo radiactivo. Como las dosis en la tiroides atribuibles al accidente que se comunicaron fueron bajas en general, es poco probable que se produzca un aumento del cáncer de tiroides infantil atribuible al accidente. Sin embargo, persisten incertidumbres con respecto a las dosis equivalentes en la tiroides recibidas por los niños inmediatamente después del accidente.

No se han observado efectos prenatales de la radiación y no se prevé que se produzcan, dado que las dosis notificadas son muy inferiores a los umbrales a los que pueden generarse esos efectos. No se han notificado abortos no deseados atribuibles a la situación radiológica. En cuanto a la posibilidad de que la exposición de los padres tenga efectos hereditarios en sus descendientes, el UNSCEAR concluyó que, en general, “[s]i bien se ha demostrado un aumento de la incidencia de los efectos hereditarios en estudios hechos con animales, en los seres humanos por el momento esos efectos no pueden atribuirse a la exposición a radiaciones” [167].

Se informó de algunos trastornos psicológicos entre la población afectada por el accidente nuclear. Puesto que esas personas sufrieron los efectos combinados de un gran terremoto y un tsunami devastador, junto con el accidente, es difícil determinar en qué medida esos efectos podrían atribuirse al accidente nuclear por sí solo. El Estudio sobre la Salud Mental y el Modo de Vida, efectuado en el marco del Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima, revela la existencia de problemas psicológicos relacionados con lo ocurrido en algunos grupos vulnerables de la población afectada, por ejemplo aumentos de la ansiedad y trastornos de estrés postraumático. El UNSCEAR estimó que “[e]l efecto más importante [del accidente] desde el punto de vista de la salud es el que se produce en el bienestar mental y social y que guarda relación con el enorme impacto del sismo, el tsunami y el accidente nuclear, y el temor y el estigma relacionados con el riesgo percibido de exposición a la radiación ionizante” [148].

En el marco del Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima descrito en el recuadro 4.2 se está llevando a cabo un examen médico completo de la población afectada. El programa tiene por objeto detectar y tratar precozmente las enfermedades, así como prevenir las enfermedades relacionadas con el modo de vida. Además de los reconocimientos médicos generales de rutina realizados en el lugar de trabajo o por la administración local, se están practicando pruebas adicionales, como el recuento diferencial de leucocitos [220].

4.4.1. Efectos tempranos de la radiación en la salud

La exposición a la radiación puede provocar efectos en la salud debido a la muerte celular. Estos efectos pueden abarcar desde lesiones cutáneas hasta el colapso de tejidos vitales, y su gravedad aumenta con la dosis. En su mayoría se producen pronto tras la exposición a una dosis superior a los umbrales conocidos para cada efecto posible. La información disponible indica que ninguna persona recibió como consecuencia del accidente una dosis igual o superior a esos umbrales que pudiera causar efectos agudos por radiación. Dos trabajadores estuvieron expuestos en las piernas a agua contaminada de la sala de turbinas. Según los informes, las dosis equivalentes en la piel de estos trabajadores fueron inferiores al umbral estimado para los efectos deterministas⁹⁷ [81] y a los límites internacionales aplicables⁹⁸ [222].

⁹⁷ La estimación de la ICRP relativa a la exposición de la piel es que algunas horas después de recibirse dosis superiores a 2000 mGy se produce una respuesta temprana, como un eritema temprano transitorio, cuando la superficie expuesta es relativamente grande. La ICRP estima también que los umbrales de dosis aproximados son los siguientes: eritema temprano transitorio: 2000 mGy, reacción eritematosa principal: 6000 mGy, depilación temporal: 3000 mGy, depilación permanente: 7000 mGy, descamación seca: 14 000 mGy, descamación húmeda: 18 000 mGy, ulceración secundaria: 24 000 mGy, eritema tardío: 15 000 mGy, necrosis isquémica de la piel: 18 000 mGy, atrofia dérmica (primer estadio): 10 000 mGy, telangiectasia: 10 000 mGy, y necrosis dérmica (estadio final): >15 000 mGy [221].

El UNSCEAR ya había señalado que “[n]o se han observado muertes o enfermedades graves relacionadas con la radiación entre los trabajadores y la población general expuestos a la radiación a raíz del accidente” [223].

4.4.2. Posibles efectos tardíos de la radiación en la salud

En las graves circunstancias y condiciones del accidente, de los aproximadamente 23 000 trabajadores que participaron en las operaciones de emergencia, 174 recibieron una dosis superior a 100 mSv. El UNSCEAR concluyó que entre ese grupo “cabría esperar un mayor riesgo de cáncer en el futuro. Sin embargo, no se prevé un aumento perceptible de la incidencia de cáncer en ese grupo a causa de la dificultad de confirmar una incidencia tan reducida en comparación con las fluctuaciones estadísticas normales de la incidencia de cáncer” [223].

En relación con los posibles efectos tardíos en la población, se han publicado estimaciones internacionales antes del presente informe (véase el recuadro 4.1). La OMS publicó una estimación hipotética⁹⁹ de los riesgos adicionales de contraer leucemia, cáncer de mama, cáncer de tiroides y todas las neoplasias malignas sólidas a lo largo de la vida con respecto a las tasas basales para la población de los lugares en que se registraron las tasas de dosis más altas, basada en sus estimaciones preliminares de las dosis¹⁰⁰ [146, 147].

Tras su actualización de la dosis estimada, el UNSCEAR comunicó que:

“[I]as dosis recibidas por la población general, tanto las registradas durante el primer año como las estimadas para toda la vida, son por lo general bajas o muy bajas. No se prevé un aumento discernible de la incidencia de efectos en la salud relacionados con la radiación entre la población general expuesta y su descendencia” [223].

Antes de informar sobre el accidente, el UNSCEAR había comunicado a la Asamblea General de las Naciones Unidas que “el aumento de la incidencia de los efectos en la salud de la población no puede atribuirse con seguridad a exposición crónica a niveles de radiación típicos del promedio mundial de radiación de fondo” [167]. La información disponible indica que la población recibió dosis anuales que no superaron las dosis anuales causadas por los niveles típicos de radiación de fondo. Esto indica que no se prevé un aumento discernible de la incidencia de efectos en la salud relacionados con la radiación entre la población expuesta y sus descendientes, de acuerdo con las estimaciones del UNSCEAR.

⁹⁸ El límite de dosis ocupacional recomendado para la piel en las situaciones de exposición planificadas es una dosis equivalente de 500 mSv/año, promediada para una superficie de piel de 1 cm² independientemente de la superficie expuesta (véanse el cuadro 6 de la referencia [129] y el apéndice III de la referencia [198]). El criterio genérico establecido para las dosis agudas en la piel, ante las cuales deben tomarse medidas protectoras y otras medidas de respuesta en todas las circunstancias a fin de evitar efectos deterministas graves o reducirlos al mínimo, son de 10 000 mGy recibidos en 100 cm² de dermis (estructuras de la piel a una profundidad de 40 mg/cm² (o 0,4 mm) bajo la superficie). (Véase el cuadro IV.1 de la referencia [198].)

⁹⁹ Habida cuenta de la limitada información de que se disponía entonces, la evaluación contenía varios supuestos prudentes. La OMS indicó que “se había hecho todo lo posible para evitar cualquier subestimación de las dosis” y que “se habían podido producir algunas sobrestimaciones” [146].

¹⁰⁰ En la evaluación del riesgo para la salud realizada por la OMS se señaló que “en las dos zonas más afectadas de la prefectura de Fukushima, la estimación preliminar de las dosis de radiación efectivas en el primer año osciló entre 12 y 25 mSv” y, sobre la base de estas estimaciones, que “en la zona en que se registraron las dosis más elevadas, es probable que la estimación de los riesgos adicionales de leucemia, cáncer de mama, cáncer de tiroides y todas las neoplasias malignas sólidas a lo largo de la vida con respecto a las tasas basales sea una estimación máxima del riesgo, en la medida en que las opciones metodológicas fueron elegidas conscientemente a fin de evitar una subestimación de los riesgos. Se prevé que los riesgos de contraer leucemia a lo largo de la vida aumenten hasta aproximadamente un 7 % con respecto a las tasas basales de cáncer en hombres expuestos a la radiación durante la lactancia; que los riesgos estimados de contraer cáncer de mama a lo largo de la vida aumenten hasta aproximadamente un 6 % con respecto a las tasas basales en mujeres expuestas a la radiación durante la lactancia; que los riesgos estimados de contraer cualquier neoplasia maligna sólida a lo largo de la vida aumenten hasta un 4 % con respecto a las tasas basales en mujeres expuestas a la radiación durante la lactancia, y que el riesgo de contraer cáncer de tiroides a lo largo de la vida aumente hasta un 70 % con respecto a las tasas basales en mujeres expuestas a la radiación durante la lactancia. Dichos porcentajes corresponden a la estimación del incremento relativo con respecto a las tasas basales, y no a la estimación del riesgo absoluto de padecer los cánceres mencionados” [147].

Esta estimación se aplica también en general al caso especial del cáncer de tiroides en adultos. En la vida adulta, este riesgo es mucho menor que cuando la exposición se produce en la infancia (véase el análisis de los efectos en la tiroides de los niños que figura más adelante). Dadas las dosis equivalentes de radiación comunicadas para la tiroides, es poco probable que se produzca un aumento discernible del cáncer de tiroides en la población adulta.

Para los pocos trabajadores que recibieron dosis equivalentes altas en la tiroides (véase la sección 4.3.2), cabría inferir un aumento del riesgo de padecer trastornos tiroideos. Esos niveles de dosis equivalente en la tiroides pueden reducir la función de la glándula hasta el punto de producir hipotiroidismo. No se prevé un aumento del hipertiroidismo porque las dosis equivalentes notificadas para la tiroides son inferiores al nivel de alrededor de 15 000 mSv por encima del cual pudieran darse esos efectos. Los efectos de las dosis equivalentes bajas y medias en la tiroides, que constituyen típicamente el rango de dosis recibidas por los trabajadores de emergencias, son difíciles de cuantificar, y las posibilidades de que se produzcan efectos, y la magnitud de estos, no están claras.

4.4.3. Efectos de la radiación en los niños

Los posibles efectos de la radiación en los niños son motivo de especial preocupación. Las recomendaciones y normas internacionales sobre protección radiológica tienen en cuenta a los niños de una población expuesta. Para los fines de la protección radiológica, postulan un riesgo radiológico nominal potencial para toda la población, es decir, para una población que incluye a niños¹⁰¹, que es alrededor de un 30 % más alto que el de una población adulta (esos riesgos nominales se han estimado sobre la base de estudios epidemiológicos de poblaciones expuestas a dosis altas de radiación) [129, 224].

Efectos en la tiroides de los niños

En lo que respecta al cáncer de tiroides, los niños son más sensibles a la radiación que los adultos. Ante una incorporación dada de yodo radiactivo en el organismo, la dosis que va a parar a la tiroides es ocho o nueve veces superior en un lactante que en un adulto. Una presencia importante de ¹³¹I en el medio ambiente puede producir cáncer de tiroides en los niños. La incidencia normal de algunos tipos de cáncer de tiroides infantil es baja, y la sensibilidad de la glándula tiroides de los niños a la radiación es alta. Debido a esta mayor sensibilidad, después del accidente era importante realizar un cribado de seguimiento para detectar todo aumento temprano posible de la incidencia de este tipo de cáncer [225].

Los resultados de tres años de exámenes de la tiroides con ultrasonidos realizados en el marco del Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima se dieron a conocer en un informe [226]. El cribado incluyó a unos 370 000 menores que tenían entre 0 y 18 años de edad en el momento del accidente. Tras este reconocimiento inicial comenzaron en 2014 los exámenes completos de la tiroides y los residentes serán monitorizados regularmente en años posteriores.

Los exámenes de la glándula tiroides se efectúan con equipo de ecografía de alta sensibilidad. El cribado ha permitido detectar anomalías asintomáticas¹⁰² de la tiroides —nódulos, quistes y cánceres— que no se habrían detectado si se hubiera examinado a los niños asintomáticos con equipo estándar. La realización del mismo reconocimiento en niños residentes en zonas lejanas al área afectada por el accidente dio resultados parecidos [227]. El período de latencia del cáncer de tiroides provocado por la radiación es más largo que los cuatro años que han transcurrido desde el accidente. Muchos de los casos de cáncer de tiroides se encontraron en niños en la adolescencia avanzada, pero no se encontró ninguno en el grupo más vulnerable de los niños que tenían menos de 5 años el 11 de marzo de 2011. La proporción de casos sospechosos o malignos fue casi la misma entre las distintas

¹⁰¹ El término ‘niños’ comprende a las personas expuestas durante la lactancia, la infancia y la adolescencia.

¹⁰² Son efectos asintomáticos aquellos que no producen síntomas, es decir aquellos en que nada indica un estado patológico, en particular nada que sea evidente para los niños, sus padres o incluso los médicos.

regiones de la prefectura de Fukushima en el cribado inicial realizado en 2011-2013 [228]. Estos factores hacen pensar que es poco probable que las anomalías de la tiroides detectadas en el estudio estén relacionadas con la exposición a la radiación debida al accidente.

Según los datos facilitados sobre las mediciones indirectas de la dosis equivalente externa debida a la actividad en la tiroides (véase la figura 4.10), las dosis equivalentes en la tiroides de los niños parecen haber sido bajas. Con los niveles de dosis notificados, un aumento del cáncer de tiroides en los niños no sería atribuible a la exposición a la radiación.

4.4.4. Efectos prenatales causados por la radiación

Por ‘efecto prenatal de la exposición’ se entiende un efecto de la radiación en el embrión o el feto. A unas dosis absorbidas inferiores a 100 mGy, se considera que los efectos letales de la irradiación en el período de desarrollo embrionario previo a la implantación son muy poco frecuentes, y el umbral de dosis absorbida para la generación de otros efectos es de aproximadamente 100 mGy [229 a 231]. Las dosis absorbidas por el embrión y el feto que podrían atribuirse al accidente fueron muy inferiores al umbral de dosis absorbida a partir del cual se producen esos efectos.

El estudio sobre los embarazos realizado en el marco del Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima (véase el recuadro 4.2) ayudó a prestar la atención médica y el apoyo adecuados a las madres, que recibieron la libreta de salud maternoinfantil entre el 1 de agosto de 2010 y el 31 de julio de 2011, y a sus hijos. Este estudio se actualiza cada año para tener en cuenta los nuevos datos, especialmente sobre los embarazos y los partos [162]. La finalidad es reunir datos que puedan mejorar la atención obstétrica y prenatal y apoyar a las mujeres que estaban embarazadas o que dieron a luz en la prefectura de Fukushima después del accidente. A juzgar por los resultados del estudio, no hubo consecuencias adversas importantes, y las incidencias de las muertes prenatales, los partos prematuros, el bajo peso al nacer y las anomalías congénitas fueron parecidas a las de otras partes del Japón [232].

El UNSCEAR informó a la Asamblea General de las Naciones Unidas de que “[s]i bien se ha demostrado un aumento de la incidencia de los efectos hereditarios en estudios hechos con animales, en los seres humanos por el momento esos efectos no pueden atribuirse a la exposición a radiaciones” [167]. Por lo tanto, las conclusiones del presente informe indican que no habrá efectos hereditarios atribuibles al accidente.

Después de los accidentes que entrañan una posibilidad importante de exposición a la radiación, algunas mujeres gestantes piden asesoramiento médico sobre la conveniencia de interrumpir su embarazo. En el caso del accidente de Fukushima Daiichi, un estudio del Departamento de Obstetricia y Ginecología de la Universidad Médica de Fukushima informó de que después del accidente no había habido ningún aborto voluntario de ese tipo [232, 233].

4.4.5. Consecuencias psicológicas

Aunque no son directamente atribuibles a la exposición a la radiación, las consecuencias psicológicas se examinan en el presente informe. El UNSCEAR señaló que:

“El efecto más importante desde el punto de vista de la salud es el que se produce en el bienestar mental y social y que guarda relación con el enorme impacto del sismo, el tsunami y el accidente nuclear, y el temor y el estigma relacionados con el riesgo percibido de exposición a la radiación ionizante. Ya se ha informado de efectos como síntomas de depresión y estrés postraumático.” [148]

Se han realizado varios estudios sobre trastornos psicológicos después del accidente de la central nuclear de Fukushima Daiichi. Estos estudios se concentraron en gran medida en las mujeres embarazadas y madres de lactantes, los socorristas y los trabajadores que llevaron a cabo la limpieza, y los evacuados. Se han detectado algunas consecuencias psicológicas en la población afectada [234 a 244]¹⁰³. Según esos estudios, la comunicación y difusión de información exacta a la población en una fase temprana y durante el desarrollo del accidente contribuyó a aliviar las reacciones psicológicas indeseadas [150].

La más grande de esas iniciativas es el Estudio sobre la Salud Mental y el Modo de Vida realizado en el marco del Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima [248], que tiene por finalidad proporcionar una atención adecuada principalmente a los evacuados que corren más riesgo de desarrollar problemas de salud mental, como el trastorno de estrés postraumático, ansiedad y estrés. Los cuestionarios contenían medidas estándar de los síntomas del trastorno de estrés postraumático y de sufrimiento psicológico (ansiedad), así como preguntas sobre la preocupación por la exposición a la radiación y la adversidad causada por el terremoto y el tsunami (por ejemplo, la pérdida de familiares inmediatos o parientes, los daños a las viviendas, la pérdida del empleo, la disminución de los ingresos y el desplazamiento dentro o fuera de la prefectura de Fukushima).

Se publicaron los resultados del Estudio sobre la Salud Mental y el Modo de Vida [236], que confirmaron que la población afectada experimentó un sufrimiento considerable y presentaba síntomas de trastorno de estrés postraumático. El estudio señaló que “los datos sociodemográficos indicaron que muchas familias evacuadas habían quedado separadas después del desastre y habían tenido que mudarse varias veces”, lo que causó problemas psicológicos.

Se emplearon otros dos métodos para evaluar el estado de salud mental de los adultos evacuados [249, 250] y se realizó un estudio adicional para evaluar el alcoholismo [251]. Estos estudios indicaron que los síntomas de problemas mentales eran sustancialmente peores que los que cabría prever en estudios de la población en general [237]. Se evaluó el estado de salud mental de los niños utilizando otro método basado en cuestionarios [252, 253], que indicó la existencia de algunas dificultades psicológicas entre los niños encuestados, pero con una mejora relativa de año en año.

También se realizaron estudios en los trabajadores afectados. En un estudio en que se comparó a los trabajadores de las centrales nucleares de Fukushima Daiichi y Fukushima Daini en el período de abril a junio de 2011, se encontraron muchos más síntomas de sufrimiento psicológico general y respuestas de estrés postraumático entre los trabajadores de Fukushima Daiichi (véase la figura 4.14). En ambos grupos de trabajadores había también asociaciones estadísticamente significativas entre la discriminación y el agravio experimentados y los síntomas de ambos trastornos.

¹⁰³ En otras situaciones traumáticas se han detectado consecuencias psicológicas que pueden incluir depresión, respuestas de estrés postraumático, ansiedad crónica, trastornos del sueño, cefaleas fuertes y un aumento del consumo de tabaco y alcohol, además de comportamientos disfuncionales tales como ira intensa, desesperación, ansiedad extrema por la salud, y sentimientos de estigmatización y discriminación. Como se ha demostrado tras otros accidentes, por ejemplo después del accidente de Chernóbil, la mayoría de las personas afectadas son generalmente resilientes a los trastornos psicológicos, pero varios estudios han señalado excepciones a esta norma [169, 245 a 247].

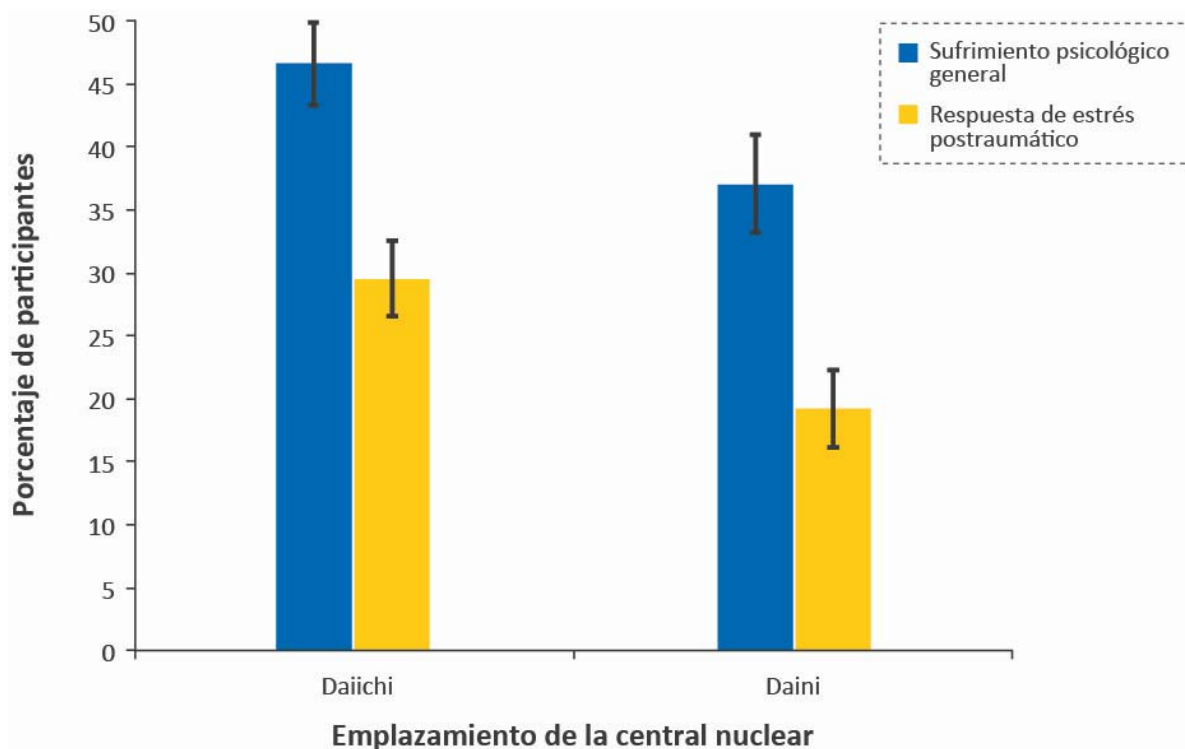


Fig. 4.14. Porcentaje de trabajadores de las centrales nucleares de Fukushima Daiichi y Fukushima Daini que comunicaron síntomas de sufrimiento psicológico, abril de 2011 [242].

4.5. CONSECUENCIAS RADIOLÓGICAS PARA LA BIOTA NO HUMANA

No se han comunicado observaciones de efectos directos en las plantas y los animales provocados por la radiación, aunque se realizaron estudios observacionales limitados en el período inmediatamente posterior al accidente. Hay limitaciones en las metodologías disponibles para evaluar las consecuencias radiológicas, pero, teniendo en cuenta la experiencia anterior y los niveles de radionucleidos presentes en el medio ambiente, es improbable que se registren consecuencias radiológicas importantes para las poblaciones de la biota o los ecosistemas como consecuencia del accidente.

La protección del medio ambiente¹⁰⁴ incluye “la protección y conservación de: especies no humanas, tanto animales como vegetales, y su biodiversidad, [y de] bienes y servicios ambientales”. La expresión comprende también “la producción de alimentos y piensos; recursos utilizados en la agricultura, la silvicultura, la pesca y el turismo; servicios utilizados en actividades espirituales, culturales y recreativas; medios como el suelo, el agua y el aire; y procesos naturales como los ciclos del carbono, el nitrógeno y el agua” [198]. El terremoto y el tsunami causaron un importante estrés ambiental en los medios terrestre y marino en la costa nororiental de Honshu [254, 255]¹⁰⁵.

La prioridad inmediata después del accidente fue la protección de las personas y no la de las especies del medio ambiente, para las que no es fácil controlar la exposición. Aunque se evacuó a los residentes en un radio de 20 km alrededor de la central para reducir sus exposiciones a la radiación,

¹⁰⁴ En el contexto del presente informe, la expresión ‘medio ambiente’ se refiere a las condiciones en que viven o se desarrollan las personas, los animales y las plantas y que sostienen la vida y el desarrollo, especialmente las que se ven afectadas por las actividades humanas [198].

¹⁰⁵ Se pueden consultar otros informes sobre el efecto del tsunami en el ecosistema en la referencia [256].

fue inevitable que se produjese la exposición de los organismos no humanos de esas zonas. Los métodos utilizados en el presente informe para evaluar los posibles efectos radiológicos del accidente en los organismos no humanos fueron los recomendados por la ICRP [224, 257]. Las exposiciones estimadas se compararon luego con la información sobre los efectos de esas exposiciones en diferentes tipos de plantas y animales publicados en la literatura (véanse las referencias [258, 259]).

Las incertidumbres generales que conllevan los tipos de modelos aplicados en esta evaluación son grandes, especialmente cuando se utilizan supuestos sobre transferencias ambientales [260]. Estas metodologías de evaluación suelen basarse en supuestos sencillos, y normalmente se toman en cuenta las incertidumbres utilizando supuestos prudentes. Los niveles de referencia empleados para relacionar las dosis calculadas con los efectos de la radiación se refieren principalmente a las exposiciones crónicas, no a las agudas, y a un abanico restringido de organismos, no a poblaciones o ecosistemas. Las actuales metodologías no tienen en cuenta las interacciones entre los componentes de los ecosistemas ni el impacto combinado de la radiación y otros factores de estrés ambiental. Son necesarias mejoras en las metodologías de evaluación y en la comprensión de los efectos que la radiación provoca en los ecosistemas.

Las dosis absorbidas estimadas alcanzaron sus valores más altos para las plantas en las primeras semanas después del accidente, pero se mantuvieron por debajo de los niveles en que cabría prever efectos agudos. En el caso de algunos organismos de referencia terrestres (como el pino, la hierba, el ciervo y la rata) se superaron los niveles de referencia pertinentes en la primera fase después del accidente. Sin embargo, no se ha observado ningún efecto general en las poblaciones de estos organismos ni en los ecosistemas.

Publicaciones anteriores del UNSCEAR [261, 262] habían señalado que podrían registrarse daños menores en las coníferas a dosis inferiores a 1,2 Gy, y daños más graves y letales a dosis de entre 10 y 20 Gy. A partir de las dosis evaluadas cabe deducir que son improbables efectos letales directos en la hierba silvestre porque es más resistente a la radiación. En cuanto a los animales terrestres, las tasas de dosis estimadas en la primera fase indicaron que era baja la probabilidad de que se produjesen trastornos reproductivos.

Aunque las tasas de dosis superaron algunos de los valores de referencia en las primeras fases del accidente, no se prevé ningún efecto en las poblaciones de animales y plantas ni en los ecosistemas. Tampoco se prevén efectos a largo plazo, puesto que las estimaciones de las dosis a corto plazo fueron en general muy inferiores a los niveles en que cabría prever efectos perjudiciales agudos, y las tasas de dosis disminuyeron con relativa rapidez después del accidente.

4.6. OBSERVACIONES Y LECCIONES APRENDIDAS

Como resultado de la evaluación de las consecuencias radiológicas del accidente se han compilado varias observaciones y enseñanzas.

— **En caso de emisión accidental de sustancias radiactivas al medio ambiente, es preciso cuantificar y caracterizar sin demora la cantidad y composición de la emisión. Cuando se trata de emisiones importantes, se requiere un programa amplio y coordinado de monitorización ambiental a largo plazo para determinar la naturaleza y el alcance de los efectos radiológicos en el medio ambiente a nivel local, regional y mundial.**

La cuantificación y caracterización del término fuente del accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi resultó difícil. La pronta monitorización del medio ambiente proporciona una confirmación de los niveles de radionucleidos y una base inicial para proteger a las personas. Los resultados pueden utilizarse para informar a la población y elaborar estrategias de respuesta y actividades de recuperación. También es importante seguir monitorizando el medio ambiente para verificar la ausencia de nuevas emisiones significativas de radionucleidos y proporcionar

información a los responsables de la adopción de decisiones y a las otras partes interesadas sobre la posible redistribución de los radionucleidos en el medio ambiente con el tiempo.

- **Los órganos internacionales competentes deben elaborar explicaciones de los principios y criterios de la protección radiológica que sean comprensibles para los no especialistas, a fin de aclarar su aplicación a los responsables de la adopción de decisiones y a la población. Puesto que algunas medidas de protección que se prolongaron en el tiempo tuvieron un efecto perturbador en las personas afectadas, se necesita una mejor estrategia de comunicación para dar a conocer la justificación de esas medidas y acciones a todos los interesados, incluida la población.**

Existe una necesidad manifiesta de explicaciones simples sobre varias cuestiones relativas a la protección contra la radiación, entre ellas las siguientes:

- las diferencias entre los conceptos de límite de dosis y nivel de referencia y su fundamento;
- los criterios que justifican las acciones y medidas protectoras encaminadas a evitar las dosis de radiación a largo plazo, en particular cuando suponen una perturbación importante de la vida normal;
- las situaciones específicas relacionadas con la protección radiológica de los trabajadores en una emergencia.

Los principios de la protección radiológica se basan no solo en la ciencia, sino también en juicios de valor que se sustentan en principios éticos. En algunas circunstancias, las acciones y medidas de protección entrañan una perturbación social prolongada. En esos casos, el beneficio que puede reportar el hecho de evitar las dosis de radiación debe sopesarse con el perjuicio individual y social causado por las propias acciones y medidas de protección. Es importante que se explique a los interesados la justificación de las acciones y medidas de protección radiológica a largo plazo.

- **Las decisiones prudentes en relación con la actividad específica y las concentraciones de actividad en los productos de consumo y la actividad de la deposición dieron lugar a amplias restricciones, con las consiguientes dificultades. En una situación de exposición prolongada, es ventajosa la coherencia entre las normas internacionales, y entre las normas internacionales y nacionales, en particular las relativas al agua potable, los alimentos, los productos de consumo no comestibles y la actividad de la deposición en la tierra.**

Las autoridades japonesas impusieron medidas para controlar la presencia de sustancias radiactivas en los productos de consumo, que fueron, en general, más rigurosas de lo que exigía la orientación internacional. El sistema internacional actual de control de la radiactividad en los productos de consumo se rige por orientaciones específicas, como las del Codex Alimentarius para los alimentos (incluida el agua embotellada) que circulan en el comercio internacional, las normas de seguridad del OIEA sobre los alimentos y el agua potable para su uso en situaciones de emergencia, las directrices de la OMS para el agua potable en situaciones de exposición existentes y las normas de seguridad del OIEA para los productos no comestibles con fines de exención. Es necesario asegurar la coherencia entre las normas internacionales sobre los niveles aceptables de radiactividad en los productos de consumo público, a fin de facilitar su aplicación por los órganos reguladores y su comprensión por la población. Las normas nacionales tienen que estar armonizadas con las internacionales siempre que sea posible. Además, se necesitan criterios para hacer frente a la presencia prolongada de radionucleidos en la tierra.

- **La monitorización radiológica individual de grupos representativos de la población proporciona información muy valiosa para obtener estimaciones fiables de las dosis de radiación, y debe utilizarse conjuntamente con mediciones ambientales y modelos adecuados de estimación de dosis para evaluar la dosis recibida por la población.**

La primera estimación de las dosis se basó en mediciones medioambientales y en modelizaciones y dio lugar a algunos supuestos prudentes sobre las dosis recibidas y proyectadas.

La monitorización individual del ^{131}I en la tiroides de los niños debe realizarse lo antes posible tras la emisión de yodo radiactivo al medio ambiente, debido al breve período de semidesintegración de este radionucleido. La monitorización individual de la radiación externa y de la presencia interna de radionucleidos de período más largo (como el ^{137}Cs) debe iniciarse cuanto antes y continuar por el tiempo que sea adecuado.

A falta de mediciones personales de la radiación, puede ser necesario modelar los datos medioambientales y de las condiciones ambiente para estimar las dosis recibidas por las personas. En estos casos, las incertidumbres relacionadas con los supuestos utilizados en los modelos deben explicarse claramente, sobre todo si los resultados se están empleando para fundamentar la adopción de decisiones sobre las acciones y medidas de protección o para estimar la posibilidad de efectos en la salud provocados por la radiación.

- **Si bien los productos lácteos no fueron la principal vía de ingestión de yodo radiactivo en el Japón, está claro que el modo más importante de limitar las dosis recibidas por la tiroides, especialmente en el caso de los niños, es restringir el consumo de leche fresca de vacas en pastoreo.**

Las estimaciones de las dosis en la tiroides de los niños después del accidente fueron bajas. Esto se debió a una combinación de factores, como la temporada del año (antes del período vegetativo), las prácticas agropecuarias en el Japón, el bajo consumo de leche de vaca por los lactantes y los controles sobre el consumo de leche que se implantaron de inmediato. Estos factores contribuyeron al bajo nivel de incorporación de ¹³¹I.

- **Se necesita un sistema robusto de monitorización y registro de las dosis de radiación ocupacionales, por todas las vías pertinentes, especialmente las ocasionadas por la exposición interna en que puedan haber incurrido los trabajadores durante las actividades de gestión de un accidente severo. Es esencial que se disponga de equipo de protección individual adecuado y suficiente para limitar la exposición de los trabajadores durante las actividades de respuesta a una emergencia, y que los trabajadores estén suficientemente capacitados en el uso de ese equipo.**

Las mediciones directas iniciales continuas de la exposición a la radiación y de los niveles de radionucleidos incorporados en el organismo de los trabajadores de emergencias son el medio más valioso de obtener información para estimar los riesgos asociados a las radiaciones y los posibles efectos en la salud, y optimizar la protección. Es preciso monitorizar y registrar las dosis de radiación ocupacionales mediante un robusto sistema de dosímetros y mediciones individuales. La monitorización del ¹³¹I en la tiroides debe efectuarse lo antes posible.

Inmediatamente después del accidente de Fukushima Daiichi, el suministro de equipos de protección individual para restringir la exposición de los trabajadores y monitorizar la situación fue difícil.

- **Los riesgos de la exposición a la radiación y la atribución a la radiación de los efectos observados en la salud tienen que explicarse claramente a las partes interesadas, señalando de manera inequívoca que los aumentos en la incidencia de efectos en la salud en la población no son atribuibles a la exposición a la radiación, si los niveles de esta son similares a los niveles globales medios de fondo de la radiación.**

En el caso del accidente de Fukushima Daiichi, las dosis recibidas por la población fueron bajas y comparables a las dosis globales medias de fondo típicas. Es necesario informar claramente a la población, en particular a las personas afectadas, de que no se prevé ningún aumento discernible de la incidencia de efectos en la salud relacionados con la radiación en los miembros de la población expuestos y sus descendientes como consecuencia del accidente.

Es importante que todas las personas que intervengan en una emergencia, en particular los médicos, los enfermeros, los tecnólogos radiológicos y los primeros actuantes médicos, comprendan la radiación y sus posibles efectos en la salud. Para ello, es esencial que los profesionales médicos reciban una buena formación y capacitación en los temas de la radiactividad, la radiación y los efectos que la exposición a la radiación pueden tener en la salud.

- **Los estudios sobre la salud realizados después de un accidente nuclear son muy importantes y útiles, pero no deben interpretarse como estudios epidemiológicos. Los resultados de esos estudios sobre la salud tienen por objeto proporcionar información para respaldar la prestación de asistencia médica a la población afectada.**

El Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima proporciona información sanitaria valiosa para la comunidad local, que ayuda a asegurar que se detecte prontamente todo efecto en la salud y que se tomen medidas apropiadas para proteger la salud de la población. Los resultados globales

de los controles de la salud pueden proporcionar información importante, pero no deberían interpretarse erróneamente como resultados de una evaluación epidemiológica.

- **Se necesita orientación sobre la protección radiológica para hacer frente a las consecuencias psicológicas en los miembros de las poblaciones afectadas después de un accidente radiológico. Un grupo de tareas de la ICRP ha recomendado que se elaboren estrategias para mitigar las graves consecuencias psicológicas derivadas de los accidentes radiológicos [149].**

Se ha notificado la aparición de trastornos psicológicos como consecuencia del accidente. Este es un problema que se ha dado también después de otros accidentes en que ha habido exposición a la radiación. A pesar de su importancia, estas consecuencias no se han tenido en cuenta en las recomendaciones y normas internacionales sobre la protección radiológica.

- **Debe comunicarse información objetiva, comprensible y oportuna sobre los efectos de la radiación a las personas de las zonas afectadas, para aumentar su entendimiento de las estrategias de protección, aliviar sus preocupaciones y apoyar sus propias iniciativas de protección.**

Deben establecerse disposiciones a nivel nacional y local para comunicar información de manera comprensible a la población que pueda resultar afectada por un accidente con consecuencias radiológicas. Las disposiciones deben incluir la posibilidad de un diálogo de persona a persona, para que sea posible pedir aclaraciones y expresar sus preocupaciones. Estas disposiciones exigirán los esfuerzos concertados de las autoridades, los expertos y los profesionales competentes para apoyar y asesorar a las personas y las comunidades afectadas. Es importante compartir la información cuando se transmitan las decisiones adoptadas para proteger a esas personas, incluido el apoyo a sus propias iniciativas.

- **Durante la fase de emergencia la atención debe centrarse en proteger a las personas. Las dosis recibidas por la biota no se pueden controlar, y podrían ser importantes a nivel individual. El conocimiento de las repercusiones de la exposición a la radiación en la biota no humana debe fortalecerse mejorando la metodología de evaluación y la comprensión de los efectos que la radiación provoca en las poblaciones de la biota y los ecosistemas. Después de una emisión grande de radionucleidos al medio ambiente, debe adoptarse una perspectiva integrada para asegurar la sostenibilidad de la agricultura, la silvicultura, la pesca y el turismo, así como el uso de los recursos naturales.**

Puede ser difícil reducir sustancialmente las dosis recibidas por la biota no humana, debido a la inviabilidad de aplicar contramedidas. Las evaluaciones de los efectos en las plantas y los animales después de un accidente como el de la central nuclear de Fukushima Daiichi requieren la consideración de muchos factores de estrés posibles; la exposición a la radiación es solo uno de ellos. También debe prestarse atención al posible aumento y acumulación de radionucleidos de período largo en el medio ambiente, y a la forma en que podría afectar a las plantas y los animales por múltiples generaciones.

5. RECUPERACIÓN DESPUÉS DEL ACCIDENTE

Inmediatamente después del accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi se dio prioridad a la estabilización de las condiciones en la central y a la protección de la población mediante medidas que incluyeron la orden de permanecer en espacios interiores y la evacuación de los residentes de las zonas afectadas, así como la imposición de restricciones relativas a los alimentos¹⁰⁶ y al agua potable. A medida que avanzaban los trabajos y se estabilizaban las condiciones en el emplazamiento, se prestó mayor atención a la labor de recuperación del accidente, incluidas la revitalización de las comunidades y la reparación de la infraestructura.

Esta sección examina los progresos de la recuperación después del accidente hasta marzo de 2015 y los planes para el futuro. Se ocupa principalmente de la situación de exposición existente que siguió a la fase de emergencia.

5.1. RESTAURACIÓN DE ZONAS AFECTADAS POR EL ACCIDENTE FUERA DEL EMPLAZAMIENTO

El objetivo a largo plazo de la recuperación después de un accidente¹⁰⁷ es restablecer una base aceptable para que pueda existir una sociedad que funcione plenamente en las zonas afectadas. Es preciso tomar en consideración la restauración¹⁰⁸ de las zonas afectadas por el accidente a fin de reducir las dosis de radiación, de acuerdo con los niveles de referencia que se hayan adoptado. En la preparación para el regreso de los evacuados conviene tener en cuenta factores como la reparación de la infraestructura, así como la viabilidad y sostenibilidad de las actividades económicas de la comunidad.

Antes del accidente nuclear de Fukushima Daiichi no existían en el Japón políticas ni estrategias para la restauración después de un accidente y hubo que elaborarlas en el período posterior al accidente. La política de restauración fue promulgada por el Gobierno del Japón en agosto de 2011.¹⁰⁹ Por ella se asignaron responsabilidades al gobierno nacional y las administraciones locales, el explotador y la población, y se establecieron las disposiciones institucionales necesarias para ejecutar un programa coordinado de trabajo.

Se elaboró una estrategia de restauración y se inició su implementación. La estrategia específica que las zonas prioritarias de restauración son las zonas residenciales, incluidos los edificios y jardines, las tierras de labranza, las carreteras y la infraestructura, con especial hincapié en la reducción de las exposiciones externas.

La dosis externa recibida de los radionucleidos depositados en el suelo y otras superficies es la principal vía de exposición. Por consiguiente, la estrategia de restauración se centra en las actividades de descontaminación destinadas a reducir los niveles de cesio radiactivo presente en las

¹⁰⁶ Comprendidas las restricciones a la distribución y venta de alimentos, el uso de tierras agrícolas y la recolección de alimentos silvestres (véase la sección 3.3).

¹⁰⁷ La recuperación después de un accidente incluye: la restauración de las zonas afectadas por el accidente; la estabilización de las instalaciones dañadas del emplazamiento y los preparativos para la clausura; la gestión del material contaminado y de los desechos radiactivos derivados de esas actividades; y la revitalización de las comunidades y la participación de los interesados.

¹⁰⁸ La restauración se define como cualquier medida que se pueda poner en práctica para reducir la exposición a la radiación ocasionada por la contaminación existente de superficies terrestres mediante la aplicación de medidas a la propia contaminación (la fuente) o a las vías de exposición para los seres humanos.

¹⁰⁹ Ley de Medidas Especiales sobre el Manejo de la Contaminación Ambiental por Materiales Radiactivos Descargados en el Accidente de la Central Nuclear asociado con el Terremoto del Océano Pacífico frente al Distrito de Tohoku del 11 de Marzo de 2011, Ley N° 110, 2011.

zonas prioritarias, reduciendo así las posibilidades de que se diera esa exposición. Las dosis internas se siguen controlando por medio de las restricciones al consumo de alimentos, así como de las actividades de restauración de las tierras agrícolas.

Después del accidente, las autoridades japonesas adoptaron un ‘nivel de referencia’ como objetivo del nivel de dosis aplicable a toda la estrategia de restauración. Este nivel se correspondía con el extremo inferior del rango especificado en la orientación internacional. La aplicación de un nivel de referencia bajo se traduce en una mayor cantidad de materiales contaminados generados en las actividades de restauración, lo que supone un aumento de los costos y de la carga para unos recursos que son limitados. La experiencia adquirida en el Japón se podría utilizar para elaborar orientación práctica sobre la aplicación de normas de seguridad internacionales en situaciones de recuperación después de un accidente.

Se definieron dos categorías de zonas contaminadas a partir de las dosis anuales adicionales estimadas en el otoño de 2011. Se asignó al Gobierno nacional la responsabilidad de formular e implementar los planes de restauración en la primera zona (la ‘Zona Especial de Descontaminación’), en un radio de 20 km alrededor del emplazamiento de Fukushima Daiichi y en las zonas en que, según las proyecciones, las dosis anuales adicionales derivadas de la contaminación sobre el suelo superarían los 20 mSv en el primer año después del accidente. Los municipios fueron encargados de llevar a cabo actividades de restauración en la otra zona (la ‘Zona de Estudio Intensivo de la Contaminación’), en la que, según las proyecciones, las dosis anuales adicionales superarían 1 mSv pero se mantendrían por debajo de 20 mSv. Se fijaron metas específicas de reducción de las dosis, así como la meta a largo plazo de alcanzar una dosis anual adicional de 1 mSv o menos.

5.1.1. Establecimiento de un marco jurídico y regulador para la restauración

Después del accidente, el Gobierno del Japón estableció una política sobre recuperación y restauración mediante la promulgación de la ‘Ley de Medidas Especiales sobre el Manejo de la Contaminación Ambiental por Materiales Radiactivos Descargados en el Accidente de la Central Nuclear asociado con el Terremoto del Océano Pacífico frente al Distrito de Tohoku del 11 de Marzo de 2011’, en agosto de 2011 [124]. Esa Ley contiene disposiciones relativas al establecimiento de un orden de prioridad de los emplazamientos que se deben restaurar, la asignación de fondos para llevar a cabo la labor de restauración, y la participación de las partes interesadas en todo el proceso.

Los primeros pasos al elaborar un programa de restauración consisten en definir niveles de referencia adecuados y establecer una estrategia de restauración para lograr la reducción necesaria de la exposición de la población a la radiación. En la orientación internacional se recomienda seleccionar un nivel de referencia dentro del rango de dosis adicionales de 1-20 mSv/año, en función de las circunstancias existentes (recuadro 5.1) [129, 198, 263]¹¹⁰.

Es importante que, al establecer niveles de referencia dentro de este rango de valores, dichos niveles no sean demasiado elevados, ya que ello podría comprometer el objetivo de seguridad requerido, ni demasiado bajos, lo que podría traducirse en un uso no óptimo de los limitados recursos. En las fases iniciales de la restauración en el Japón en 2011, el Gobierno de Japón fijó niveles de referencia que eran deliberadamente bajos [264, 265] y se adoptó un objetivo a largo plazo para los residentes, una vez finalizada la restauración, de una dosis adicional no superior a 1 mSv/año [266]. Este es el valor más bajo del rango especificado en la orientación internacional (recuadro 5.1).

¹¹⁰ En el momento del accidente existía una versión no publicada aún de la edición provisional de las Normas Básicas Internacionales de Seguridad [263]. Posteriormente, en 2014, se publicó (en inglés) el volumen GSR Part 3 [198] de la Colección de Normas de Seguridad del OIEA.

El alto grado de prudencia del enfoque utilizado para estimar las dosis recibidas por las personas se ilustró en una evaluación del UNSCEAR [148]. Las dosis estimadas se basan en la actividad por unidad de superficie del ^{134}Cs y el ^{137}Cs , teniendo en cuenta la disminución de la actividad debida al decaimiento, la pérdida de actividad por la meteorización de las superficies, y el factor de blindaje característico de las casas de madera. Los cálculos realizados a los fines del presente informe, utilizando la misma metodología que el UNSCEAR [148, 267], indicaron que el promedio de dosis de radiación adicionales en 2012 en grandes partes de la Zona de Estudio Intensivo de la Contaminación (véase la sección 5.1.2) habría sido muy inferior a 1 mSv/año.

Recuadro 5.1. Nivel de referencia para la restauración

El ‘nivel de referencia’ es la dosis objetivo que se aplica al conjunto de la estrategia de restauración, pero no es un límite de dosis. En la orientación internacional [129, 263] se recomiendan niveles de referencia comprendidos entre 1 y 20 mSv/año para la exposición adicional de un miembro de la población en las ‘situaciones de exposición existentes’, en función de las circunstancias imperantes.

El gobierno, el órgano regulador u otra autoridad competente, según se haya dispuesto en el marco regulador nacional, establece los niveles de referencia. En una situación posterior a un accidente, estos niveles se utilizan para determinar las estrategias óptimas de restauración. Con estas estrategias se vela por que la restauración se lleve a cabo haciendo un uso eficiente de los recursos humanos, técnicos y financieros disponibles a fin de obtener los mejores resultados en la protección de las comunidades afectadas.

Las medidas específicas aplicadas para reducir la contaminación ambiental y las dosis de radiación que reciben las personas suelen regirse por ‘niveles de acción para la restauración’ derivados. Normalmente, esos niveles se expresan en términos de cantidades fácilmente mensurables, como las tasas de dosis gamma ambientales ($\mu\text{Sv/h}$) o la actividad depositada por unidad de superficie (Bq/m^2), y se derivan a partir de los niveles de referencia empleando modelos y supuestos sobre los hábitos de vida de las personas y sobre el comportamiento de los radionucleidos en el medio ambiente.

5.1.2. Estrategia de restauración adoptada

La estrategia de restauración se vio influida por el hecho de que, al imponer restricciones al consumo de alimentos y agua potable, se evitaron en gran medida las dosis internas después del accidente. Como consecuencia de ello, las medidas de restauración descritas en esta sección consistieron principalmente en actividades de descontaminación para reducir los niveles de las dosis externas.

La estrategia de restauración del Gobierno del Japón estableció un enfoque destinado a reducir rápidamente las dosis de radiación, dando prioridad a la restauración en las zonas residenciales, las tierras de labranza y las zonas forestales adyacentes a las zonas residenciales o agrícolas [124, 266]. Para facilitar esta tarea, en agosto de 2011 se clasificaron las tierras que debían ser objeto de restauración como sigue:

- **Zona Especial de Descontaminación** (figura 5.1, derecha). Esta zona se superpone a la anterior ‘Zona de Acceso Restringido’, es decir, a la zona de evacuación en un radio de 20 km alrededor de la central nuclear de Fukushima Daiichi, y a la anterior ‘Zona de Evacuación Deliberada’, situada a más de 20 km de la central, donde la dosis anual adicional para las personas podría superar los 20 mSv en el primer año después del accidente. Dentro de la Zona Especial de Descontaminación, corresponde al Gobierno nacional formular y poner en práctica los planes de restauración.
- **Zona de Estudio Intensivo de la Contaminación** (figura 5.1, derecha). Esta zona comprende los municipios en los que se estimó que la dosis de radiación adicional recibida por las personas en algunas partes de ellos durante el primer año se situaría entre 1 y 20 mSv¹¹¹. Los municipios realizan estudios de monitorización para determinar las zonas que requieren descontaminación y ejecutan actividades de restauración en esas zonas, con el apoyo financiero y técnico del Gobierno nacional.

¹¹¹ El criterio radiológico utilizado para esta zona fue una tasa de dosis ambiental de 0,23 $\mu\text{Sv/h}$. Esta tasa de dosis corresponde a una dosis efectiva adicional estimada siguiendo un criterio prudente de 1 mSv en un año.

En 2012 y 2013, las zonas para las que se habían dado órdenes de evacuación se subdividieron nuevamente en las tres categorías siguientes sobre la base de la dosis anual total estimada recibida por las personas que residieran en ellas (figura 5.1, izquierda) [268, 269]:

- **Zona 1 (verde).** Zonas en las que la orden de evacuación ya se podía levantar. Se preveía una dosis anual estimada de 20 mSv o menos.
- **Zona 2 (naranja).** Zonas en las que los residentes no tenían aún permiso para vivir. Se preveía una dosis anual estimada superior a 20 mSv.
- **Zona 3 (rojo).** Zonas a las que, según las previsiones, los residentes no podrían volver en mucho tiempo. La dosis anual estimada era superior a 50 mSv, y la dosis anual media prevista para el período de seis años después del accidente era de más de 20 mSv.

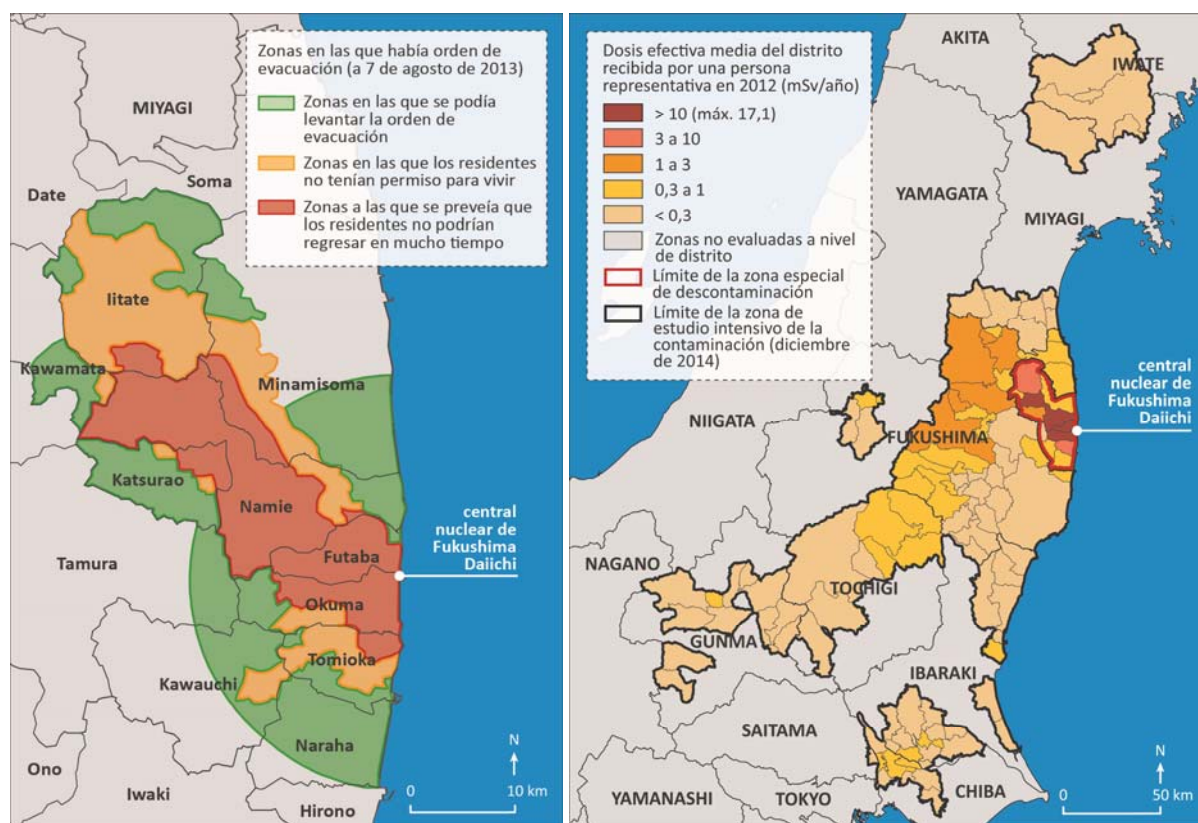


Fig. 5.1. El mapa de la izquierda muestra la subdivisión de la zona de evacuación al 7 de agosto de 2013 [270]. El mapa de la derecha muestra la designación de la 'Zona Especial de Descontaminación' y la 'Zona de Estudio Intensivo de la Contaminación' al mes de diciembre de 2014 e indica las estimaciones de las dosis de radiación adicionales recibidas por personas representativas en 2012.

5.1.3. Progresos en la restauración

En 2011 se iniciaron varios proyectos piloto. El Organismo de Energía Atómica del Japón realizó en un primer momento una serie de estudios en pequeña escala en dos lugares fuera las zonas evacuadas a fin de determinar la eficacia de la descontaminación para reducir la tasa de dosis en distintos tipos de superficie (por ejemplo, calles, tejados, muros y césped) [271]. En estudios posteriores se examinó la viabilidad de descontaminar áreas más amplias dentro de las zonas evacuadas, se evaluó la eficacia de esas medidas para reducir las tasas de dosis gamma ambientales, y se estudiaron las repercusiones para la seguridad de los trabajadores y la gestión de desechos.

Estos estudios piloto desempeñaron un papel importante en la planificación y puesta en práctica de las estrategias de restauración. Facilitaron información sobre la eficacia y aplicabilidad de las técnicas de descontaminación y ayudaron a establecer procedimientos para la protección radiológica de los trabajadores [272].

En el cuadro 5.1 figuran las medidas de restauración aplicadas de forma generalizada después del accidente de Fukushima Daiichi. La retirada de la capa superficial del suelo, que genera una gran cantidad de desechos, se utilizó ampliamente en los primeros años de la restauración.

CUADRO 5.1. MEDIDAS DE RESTAURACIÓN APLICADAS DE FORMA GENERALIZADA

Objeto	Medidas de restauración
Casas, edificios	Retirada de depósitos de tejados, cubiertas y alcantarillas Limpieza de tejados y muros Lijado con aspiración Lavado de alta presión
Patios de escuelas, jardines y parques	Retirada de la capa superficial del suelo Retirada de maleza/hierba/pastos
Carreteras	Retirada de depósitos de las cunetas Lavado de alta presión
Jardines y árboles	Siega de césped Retirada de las hojas caídas Retirada de la capa superficial del suelo Lavado de alta presión Raspado de las superficies de los árboles
Tierras de labranza	Laboreo de inversión Retirada de la capa superficial del suelo Tratamiento del suelo (por ejemplo, aplicación mejorada de fertilizantes) Endurecimiento y retirada del suelo Retirada de maleza/hierba/pastos
Producción pecuaria	Control de los niveles de cesio radiactivo en los piensos
Bosques y tierras arboladas	Retirada de hojas caídas y ramas bajas Poda

Más tarde se aplicaron estrategias de restauración tanto en la Zona de Estudio Intensivo de la Contaminación como en la Zona Especial de Descontaminación, y se lograron avances importantes. Al final de marzo de 2015 estaba casi terminada la descontaminación en la mayoría de las partes de la Zona de Estudio Intensivo de la Contaminación situadas fuera de la prefectura de Fukushima (en aproximadamente el 80 % de los municipios). En la Zona de Estudio Intensivo de la Contaminación dentro de la prefectura de Fukushima se habían descontaminado alrededor del 90 % de las instalaciones públicas, el 60 % de las viviendas residenciales y el 50 % de las carreteras [273].

Dentro de la Zona Especial de Descontaminación, en marzo de 2015 se habían completado los planes de descontaminación en cuatro municipios (la ciudad de Tamura, la aldea de Kawauchi, y los pueblos de Naraha y Okuma). También había finalizado la descontaminación de las zonas residenciales de otros dos municipios (la aldea de Katsurao y el pueblo de Kawamata), y estaba casi terminada en la aldea de Iitate [273]. Estaba previsto que la ejecución de la mayoría de los planes de descontaminación de las zonas de descontaminación 1 y 2 de la prefectura de Fukushima concluyera antes del final de marzo de 2016, aunque en algunos casos continuaría hasta 2017 (figura 5.2).

Las investigaciones realizadas en las zonas residenciales de los municipios de Tamura y Naraha mostraron que las tasas de dosis gamma ambientales se habían reducido en un promedio del 36 % y el 46 % respectivamente. Las tasas de dosis gamma (véase el recuadro 5.1) se determinaron midiendo las tasas de dosis ambientales a una distancia de 1 m de las superficies descontaminadas, tanto antes

como después de las medidas de restauración. Las reducciones de la tasa de dosis media en los dos municipios tras la aplicación de medidas de restauración en las tierras de labranza, los bosques y las carreteras se situaron entre el 21 % y el 44 % [273].

Los datos indican que la reducción de las tasas de dosis gamma ambientales es mayor en las zonas con tasas de dosis iniciales más elevadas. Después de la restauración, las tasas de dosis gamma siguen disminuyendo debido a los procesos naturales de meteorización y decaimiento radiactivo.

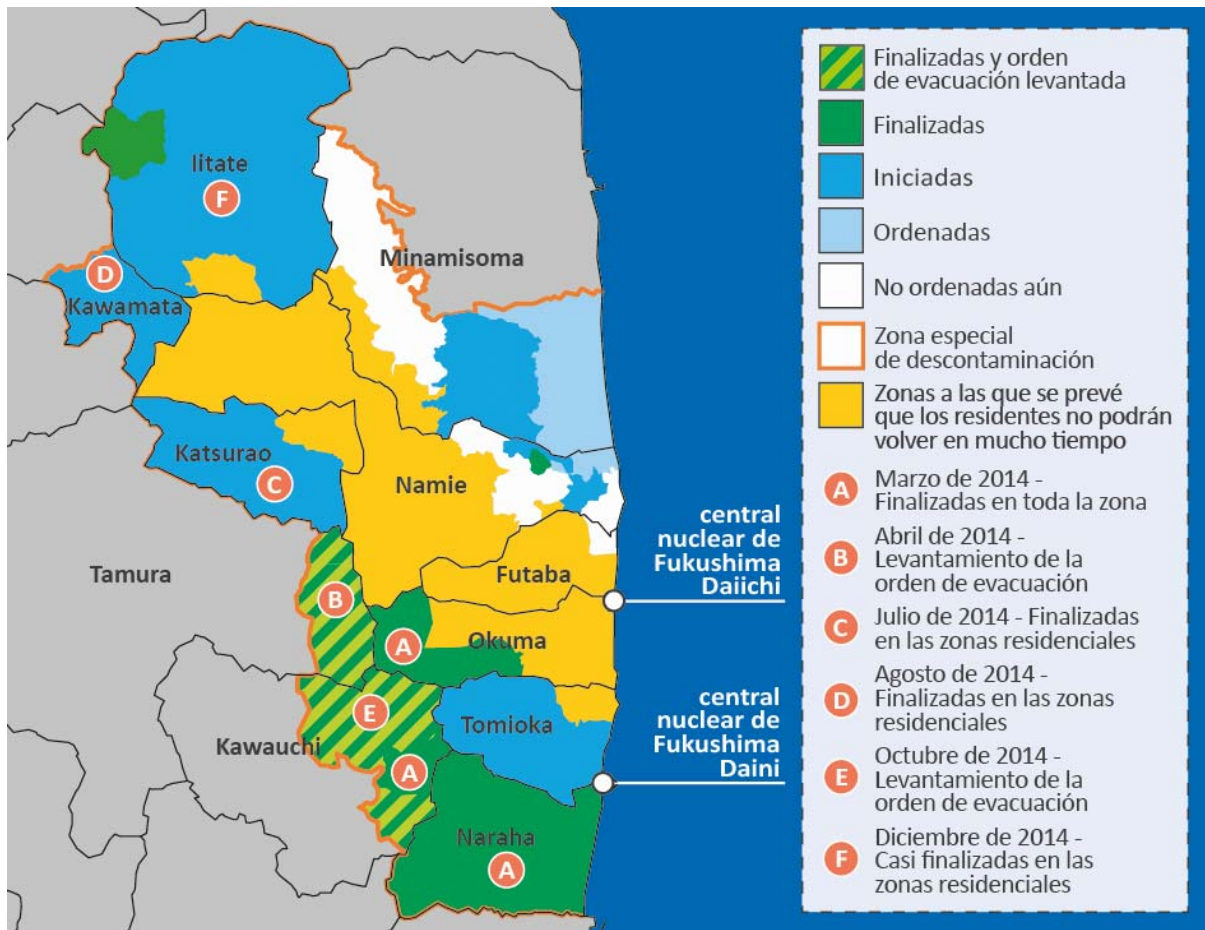


Fig. 5.2. Progresos de las actividades de restauración en la Zona Especial de Descontaminación hasta diciembre de 2014 [273].

En la figura 5.3 se muestran ejemplos de actividades de restauración.

Los costos unitarios de la descontaminación en las Zonas Especiales de Descontaminación controladas directamente por el Gobierno nacional oscilaron entre unos 1100 yen/m² (bosques) y aproximadamente 5500 yen/m² (parques) [274].

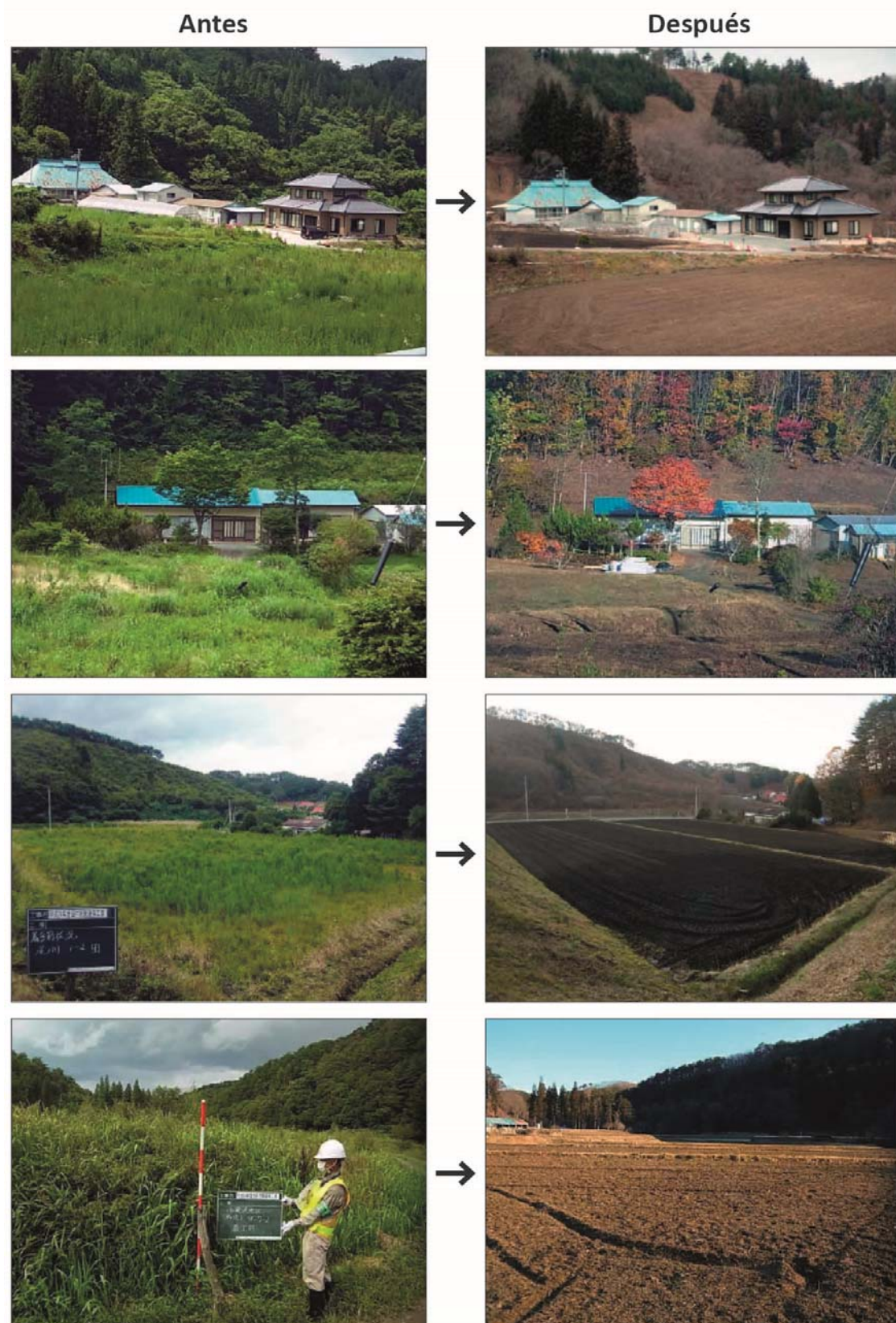


Fig. 5.3. Paisajes antes y después de la restauración en la ciudad de Tamura (fotografías: cortesía del Ministerio de Medio Ambiente del Japón).

5.2. ESTABILIZACIÓN EN EL EMPLAZAMIENTO Y PREPARATIVOS PARA LA CLAUSURA

La TEPCO y los organismos competentes del Gobierno del Japón elaboraron conjuntamente un plan estratégico amplio de alto nivel para la estabilización y clausura de la central nuclear dañada. Ese plan se publicó por primera vez en diciembre de 2011 y posteriormente se revisó a fin de tener en cuenta la experiencia adquirida y el mejor conocimiento de las condiciones de la central nuclear dañada, así como la magnitud de los desafíos futuros. El plan estratégico aborda la naturaleza compleja de los trabajos en el emplazamiento y comprende: el enfoque para garantizar la seguridad; las medidas para la clausura; los sistemas y entornos destinados a facilitar las actividades; y las necesidades en materia de investigación y desarrollo.

Cuando se redactó el presente informe se habían restablecido las funciones de seguridad y se disponía de estructuras, sistemas y componentes para mantener condiciones estables de forma fiable. No obstante, seguía siendo necesario controlar la entrada de agua subterránea a los edificios de los reactores dañados y contaminados. El agua contaminada resultante se estaba sometiendo a tratamiento para extraer los radionucleidos en la medida de lo posible y se estaba almacenando en más de 800 depósitos. Se necesitan soluciones más sostenibles que tengan en cuenta todas las opciones, comprendida la posible reanudación de la descarga controlada en el mar. Para adoptar decisiones definitivas será necesario contar con la participación de los interesados pertinentes y tener en cuenta las condiciones socioeconómicas en el proceso de consulta, así como aplicar un programa de monitorización amplio.

Se elaboraron planes para la gestión del combustible gastado y los restos de combustible y comenzó la retirada de combustible de las piscinas de combustible gastado.¹¹² También se elaboró un modelo conceptual de las actividades futuras de retirada de restos de combustible en el que se tienen en cuenta los muchos pasos preliminares requeridos, incluida la confirmación visual de la configuración y composición de esos restos. Debido a los altos niveles de dosis de radiación en los reactores dañados, en el momento de redactar el presente informe aún no había sido posible dar esa confirmación.

Las autoridades japonesas han estimado que el plazo para finalizar las actividades de clausura probablemente será de unos 30 a 40 años. Las decisiones acerca de las condiciones finales de la central y el emplazamiento serán objeto de más análisis y debates.

Recuadro 5.2. Estabilización y clausura después del accidente

Por ‘clausura’ se entienden las medidas administrativas y técnicas adoptadas para poder eliminar algunos o todos los controles reglamentarios de una instalación.

En la práctica, la clausura es la retirada progresiva de las estructuras, los sistemas y los componentes de la instalación. En circunstancias normales, la clausura de una central nuclear es una actividad planificada que se inicia una vez que se ha decidido poner fin a las operaciones. La clausura después de un accidente plantea una serie de dificultades distintas: es preciso determinar en primer lugar en qué condiciones se encuentran las instalaciones y cuál es el estado del combustible y el equipo de la instalación, y luego decidir el camino a seguir, lo que puede requerir el desarrollo de nuevas tecnologías y metodologías.

Si la parada del reactor se debe a un accidente, es necesario poner la instalación en una configuración segura (estabilización) antes de aplicar un plan final de clausura aprobado. La estabilización comprende las medidas necesarias para que las estructuras de la central (como los edificios en los que se encuentran los reactores dañados), los sistemas (como los de suministro eléctrico) y los componentes (por ejemplo, bombas y motores) estén en condición estable y puedan funcionar durante todo el tiempo que sea necesario.

¹¹² La retirada del combustible de la piscina de combustible gastado de la Unidad 4 finalizó en diciembre de 2014.

5.2.1. Plan estratégico

Tras la fase de emergencia, la TEPCO y los organismos gubernamentales competentes establecieron un plan estratégico, la ‘Hoja de ruta a medio y largo plazo para la clausura de las Unidades 1 a 4 de la central nuclear de Fukushima Daiichi’, para las actividades de estabilización y clausura [275]. El plan se publicó por primera vez en diciembre de 2011 y posteriormente se revisó para tener en cuenta la mayor experiencia adquirida y la mejor comprensión de las condiciones en el emplazamiento [276].¹¹³ Se trata de un plan estratégico amplio de alto nivel para los encargados de supervisar la recuperación. La clausura se realizará en un plazo de 30 a 40 años, según las estimaciones de las autoridades japonesas.

El plan describe el enfoque estratégico para las esferas de trabajo relativas a:

- **El enfoque para garantizar la seguridad**, que comprende objetivos estratégicos para reducir los riesgos y optimizar la retirada del combustible y de restos de combustible.
- **Las medidas a medio y largo plazo para la clausura**, que comprenden planes de retirada del combustible y de restos de combustible de cada unidad de reactor. Estos planes son suficientemente flexibles para hacer frente a las distintas condiciones que podrían descubrirse a medida que se obtenga más información durante los procesos de retirada del combustible y de restos de combustible.
- **Los sistemas y el entorno para facilitar el trabajo**, que incluyó el establecimiento por la TEPCO de una organización para la monitorización centralizada de la salud de los trabajadores y su exposición a la radiación. Prosiguieron los esfuerzos encaminados a mejorar la protección radiológica de los trabajadores, y se establecieron planes para gestionar y asegurar la disponibilidad de una fuerza de trabajo capacitada durante todo el proceso de clausura.
- **Las actividades de investigación y desarrollo**, que son necesarias, ya que buena parte de la labor que debe realizarse en la central nuclear de Fukushima Daiichi no se ha llevado a cabo nunca y requiere equipo y tecnología que aún no se ha desarrollado o utilizado en gran escala. El Instituto Internacional de Investigación sobre la Clausura de Instalaciones Nucleares fue creado con el fin de desarrollar tecnologías para la clausura de instalaciones nucleares, promover la cooperación con organizaciones internacionales y nacionales en materia de clausura de instalaciones nucleares y desarrollar recursos humanos para la investigación y el desarrollo.

5.2.2. Preparativos para la clausura

Poco después de su creación [278], la ARN elaboró un nuevo marco regulador para su aplicación a las denominadas instalaciones que han experimentado un desastre, que necesitan medidas especiales para prevenir otros accidentes y garantizar la seguridad física nuclear. El 7 de noviembre 2012, la ARN designó la central nuclear de Fukushima Daiichi como ‘Instalación de Reactor Especificada’, es decir, una instalación en la que se ha producido un accidente nuclear y respecto de la que se estipula un reglamento especial proporcionado a las condiciones imperantes en la instalación.

Esta designación permitió a la ARN exigir a la TEPCO que elaborara un plan para aplicar las medidas descritas en el plan estratégico [275]. El Plan de Aplicación de la TEPCO se presentó en diciembre de 2012 [279] y fue posteriormente aprobado. La TEPCO es responsable de ejecutar las medidas especificadas en el Plan de Aplicación. La ARN examina la ejecución de esas medidas.

¹¹³ Se prevé que habrá nuevas revisiones de la Hoja de ruta, a medida que se adapten los planes en respuesta a la evolución de las condiciones y a la disponibilidad de nueva información. La tercera revisión de la Hoja de ruta se publicó durante la fase final de la preparación del presente informe (junio de 2015). En ella se modificaron el calendario y el enfoque de la retirada del combustible y los residuos y se afinaron los criterios para la reducción de los riesgos, la comunicación con las partes interesadas locales, la reducción de la exposición de los trabajadores y la gestión de la labor de investigación y desarrollo [277].

Además, en febrero de 2014 la ARN estableció un requisito reglamentario para la gestión de la dosis efectiva adicional en los límites del emplazamiento y en febrero de 2015 determinó las ‘Medidas para la reducción de riesgos a mediano plazo en la central nuclear de Fukushima Daiichi de la TEPCO’ [280].

La TEPCO estableció condiciones estables en el emplazamiento para mantener la protección y la seguridad y permitir el avance hacia la clausura [275]. Se restablecieron y mejoraron importantes funciones de apoyo, como el suministro eléctrico normal y de reserva. También se restablecieron las funciones de seguridad fundamentales. Las disposiciones para asegurar la fiabilidad a largo plazo de las condiciones estables son, entre otras, las siguientes:

- la monitorización de las condiciones de la central;
- la refrigeración del combustible y de los restos de combustible;
- el mantenimiento de la subcriticidad nuclear;
- el control de los niveles de hidrógeno;
- la garantía de la estabilidad estructural de los edificios de los reactores;
- el control de la entrada de agua en los edificios de los reactores y la prevención de fugas al medio ambiente;
- la garantía del suministro esencial de energía eléctrica;
- la garantía del cumplimiento de las funciones de seguridad fundamentales a largo plazo.

Se restablecieron y mejoraron importantes funciones de seguridad, por ejemplo, mediante la instalación de múltiples componentes de reserva y la sustitución y/o mejora de sistemas móviles y temporales para aumentar la capacidad de los permanentes. La situación en el emplazamiento sigue siendo compleja y se precisan una monitorización y un control atentos para asegurar la continuidad de las condiciones estables.

5.2.3. Gestión del agua contaminada

El agua que llega al interior de los edificios de los reactores dañados queda contaminada y plantea un problema particularmente difícil debido a los grandes volúmenes de que se trata. Cuando se redactó el presente informe, el agua seguía entrando en los edificios de los reactores de la central nuclear de Fukushima Daiichi de dos formas distintas: el agua que se inyectaba en los núcleos de los reactores con fines de refrigeración y el agua subterránea. Seguía siendo necesario caracterizar y gestionar esa agua (figura 5.4).

Antes del accidente, el agua subterránea que llegaba desde las laderas de las montañas hasta la parte posterior de la central nuclear de Fukushima Daiichi se bombeaba a un ritmo de aproximadamente 850 m³/día desde las tuberías de drenaje subterráneo instaladas alrededor de los edificios de las Unidades 1 a 4 para controlar el nivel del agua subterránea. Como consecuencia del accidente dejaron de funcionar esas tuberías y bombas, que suprimían la flotación del edificio e impedían el acceso del agua subterránea a los edificios [281].

Después del accidente, comenzaron a entrar aproximadamente 400 m³/día de agua subterránea no contaminada en los edificios. Se hacen circular alrededor de 400 m³/día de agua entre los reactores de las Unidades 1 a 3 con fines de refrigeración. El agua subterránea que entra en los edificios se mezcla con el agua en circulación utilizada para refrigerar los reactores, lo que da lugar a un volumen total de aproximadamente 800 m³/día de agua contaminada que es preciso gestionar. Alrededor de 400 m³/día de esta agua se reinyectan en los reactores para refrigerar el combustible y los restos de combustible, y los otros 400 m³/día se almacenan en los depósitos de almacenamiento de agua contaminada [276].

El agua se somete a tratamiento para extraer los radionucleidos, con la excepción del tritio, que no se puede extraer [282]. El agua tratada se almacenaba en 826 depósitos en el emplazamiento (al 12 de febrero de 2015) [283].

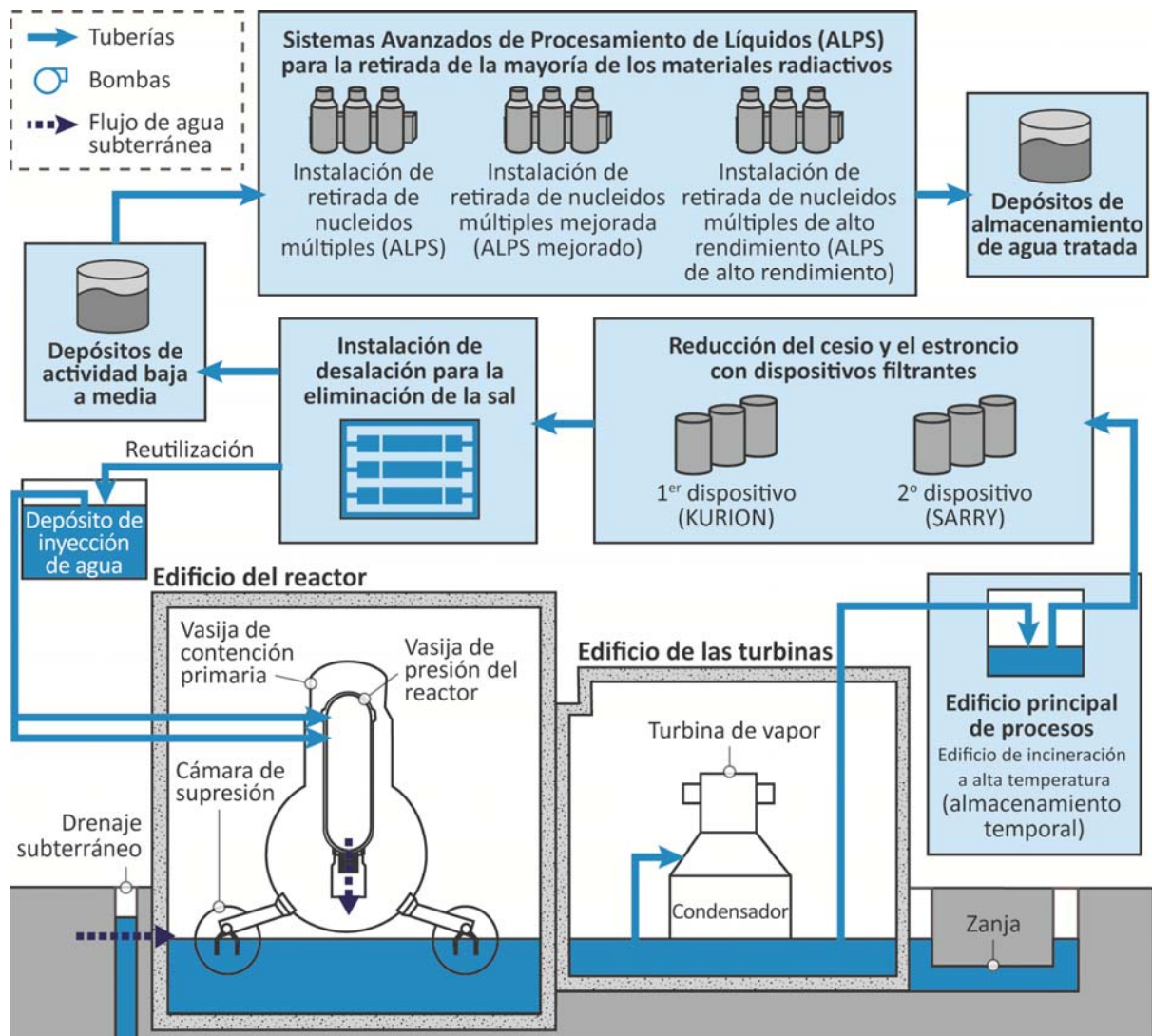


Fig. 5.4. Gestión del agua contaminada en el emplazamiento [284].

Se han implementado, o se estaban planificando, diversas técnicas de gestión del agua, entre ellas la mejora e instalación de sistemas de tratamiento y depósitos de almacenamiento adicionales, el restablecimiento del sistema de tuberías de drenaje subterráneo y la instalación de muros impermeables del lado del mar. El agua subterránea no contaminada procedente de las montañas cercanas a las instalaciones dañadas está siendo desviada por el exterior de las instalaciones hasta el océano (figura 5.5) [285]. Además, se estaba construyendo un muro criogénico ‘congelado’ en el lado de los edificios de los reactores que da a la montaña para impedir la entrada de más agua. También se había previsto la construcción de un muro criogénico en el lado de los edificios de los reactores que da al mar.

Con la aprobación de la ARN y la aceptación de los interesados pertinentes, incluidas la prefectura de Fukushima y la industria pesquera, en mayo de 2014 la TEPCO comenzó a descargar directamente en el mar el agua subterránea no contaminada desviada [285]. Gracias a esta medida se redujo el volumen de agua que había que someter a tratamiento.

Las grandes cantidades de agua contaminada en el emplazamiento plantean diversos riesgos. Por fallos en los depósitos, las tuberías y las válvulas o durante episodios de precipitaciones intensas se observaron fugas de agua con contaminación radiactiva de los componentes. En algunos casos, las fugas dieron lugar a emisiones de radionucleidos al mar. La identificación de esas fugas hizo que se

intensificara la monitorización, tanto en el emplazamiento como en el medio ambiente marino [287]. Aunque se están aplicando medidas para detener o reducir las fugas, se necesitan soluciones más sostenibles que tengan en cuenta todas las opciones, incluida la posible reanudación de la descarga controlada en el mar. Como resultado de las misiones de examen del OIEA, [288, 289] se aconsejó a la TEPCO que realizara una evaluación de los posibles efectos radiológicos de la emisión al mar de agua con tritio y otros radionucleidos residuales. También se reconoció que la adopción de decisiones definitivas exigiría la participación de todos los interesados, a saber, la TEPCO, la ARN, el Gobierno nacional, la administración de la prefectura de Fukushima, las comunidades locales y otros, y que era necesario tomar en consideración las condiciones socioeconómicas en el proceso de consulta y ejecutar un programa de monitorización amplio para garantizar que la salud humana y el medio ambiente no se vieran perjudicados [288, 289]. En este contexto, sería beneficioso disponer de más orientaciones sobre la aplicación de la orientación internacional relativa a las descargas en situaciones posteriores a un accidente.



Fig. 5.5. Ilustración de las actividades de gestión del agua. A la izquierda se ven los depósitos de almacenamiento del agua contaminada [286].

5.2.4. Retirada del combustible gastado y de los restos de combustible

La preparación para la clausura de las instalaciones dañadas en el accidente comprende la retirada del combustible gastado y de los conjuntos combustibles nuevos de las piscinas de almacenamiento que se encuentran dentro de los edificios de los reactores dañados. En noviembre de 2013, la TEPCO comenzó a retirar el combustible de la piscina de almacenamiento del edificio del reactor de la Unidad 4 y a trasladarlo a la piscina de combustible común. La operación se completó en diciembre de 2014 [290].

Se tardará varios años en retirar el combustible gastado y los conjuntos combustibles nuevos de las piscinas de almacenamiento de las Unidades 1 a 3. Una estimación más exacta del tiempo necesario depende de los progresos que se puedan hacer en la retirada de los escombros resultantes de las explosiones, la preparación de la estructura superior de las Unidades 1 a 3 para el acceso, el establecimiento de los soportes de los equipos y estructuras para la retirada, y otras medidas. El combustible gastado se colocará en una piscina común para su almacenamiento temporal.

La extracción y gestión de los restos del combustible fundido del núcleo de un reactor es una tarea mucho más compleja. La confirmación visual de la configuración y composición del combustible dañado ('restos de combustible') como consecuencia del accidente no ha sido posible debido a los elevados niveles de las dosis de radiación en los reactores dañados. Los análisis disponibles indican que en la Unidad 1 se fundió la mayor parte del combustible y que parte de ese combustible atravesó la parte inferior de la vasija de presión del reactor y llegó hasta la vasija de contención primaria, mientras que en las Unidades 2 y 3 también hubo fusión del combustible, pero una proporción mayor de este permaneció en las vasijas de presión de los reactores [9].

Cuando se redactó el presente informe, el Gobierno del Japón estaba patrocinando estudios conceptuales sobre formas de acceder a los restos de combustible y la retirada de estos [276, 291]. Se ha elaborado un modelo conceptual para actividades futuras de retirada de restos de combustible que tiene en cuenta los muchos pasos preliminares requeridos, comprendidos los siguientes:

- 1) **Reducción de los niveles de radiación en los edificios de los reactores.** El acceso de los trabajadores a los espacios interiores de los edificios de los reactores es difícil debido a las altas tasas de dosis y a los escombros y el polvo contaminado dispersos en ellos. Para poder acceder será necesaria la descontaminación, en muchos casos con equipo accionado a distancia.
- 2) **Reparación de las vasijas de contención primaria que contienen agua.** Se realizará una investigación y se desarrollará el equipo necesario para detener la fuga de agua de las vasijas de contención, tras lo cual se monitorizarán los niveles de agua, que se mantendrán en los niveles que se necesiten para las operaciones posteriores.
- 3) **Caracterización de las condiciones dentro de las vasijas de contención primaria.** Para retirar los restos de combustible es preciso determinar los lugares exactos en que esos restos se encuentran. Se desarrollará equipo para investigar las condiciones dentro de las vasijas de contención, y de ese modo se obtendrá la información necesaria, como las ubicaciones, distribuciones y formas de los trozos de restos de combustible.
- 4) **Caracterización de las condiciones dentro de las vasijas de presión de los reactores.** Esto incluye la distribución de los restos de combustible, los niveles de radiactividad y la configuración física de las vasijas de presión dañadas.
- 5) **Desarrollo de tecnologías para la retirada de los restos de combustible.** Se determinarán las condiciones previas para la retirada de los restos de combustible, lo que dará lugar al desarrollo de tecnologías y equipo para abrir los reactores, eliminar los obstáculos estructurales dentro de las vasijas de presión de los reactores y eliminar los restos de combustible.
- 6) **Gestión del agua.** Además de la refrigeración y el control con boro, será necesario gestionar cuidadosamente el agua a medida que se avance en el proceso de retirada de los restos de combustible. Por ejemplo, se precisarán medios adicionales para extraer el material particulado que quede suspendido en el agua como resultado de las operaciones de retirada.

- 7) **Embalaje, transferencia y almacenamiento de los restos de combustible.** A medida que se retiren los restos de las vasijas de presión de los reactores y las vasijas de contención primaria habrá que colocarlos en contenedores blindados. Estos deberán retirarse de los edificios de los reactores y almacenarse provisionalmente en el emplazamiento de Fukushima Daiichi hasta que se adopte una decisión definitiva respecto de su disposición.
- 8) **Prevención de la criticidad nuclear de los restos de combustible.** Se realizarán evaluaciones y se pondrán en práctica técnicas de monitorización para excluir la posibilidad de que los restos alcancen la criticidad nuclear.
- 9) **Contabilidad y control del material nuclear presente en los restos de combustible.** Será preciso llevar la contabilidad del material fisionable, de conformidad con el acuerdo de salvaguardias concertado entre el Japón y el OIEA y con el derecho interno del Japón. Puesto que no se pueden aplicar los métodos normalizados a los restos de combustible, se establecerán medidas de contabilidad antes de retirar de los reactores esos restos.

Los restos de combustible se retirarán manteniendo su inmersión en agua a fin de proporcionar blindaje y reducir al mínimo las emisiones radiactivas al aire. Debido a los altos niveles de radiación y contaminación, y al desconocimiento de la distribución y las propiedades de los restos de combustible, una gran parte de las actividades deberán realizarse con equipos accionados a distancia. Las estrategias de retirada de los restos de combustible deberán ajustarse a medida que se disponga de datos sobre el estado del combustible y los restos de combustible, al igual que los planes para diseñar, desarrollar y construir el equipo apropiado.

5.2.5. Estado final de clausura del emplazamiento

En circunstancias normales (no de accidente), el estado final de una central nuclear se define y describe en la solicitud de la licencia y los documentos complementarios posteriores. En general existen dos estrategias para alcanzar el estado final de una central: el desmantelamiento inmediato y el desmantelamiento diferido, que a veces se denomina almacenamiento seguro. En circunstancias excepcionales, por ejemplo después de un accidente nuclear, también se puede considerar la posibilidad del enterramiento [292].

Un accidente nuclear puede invalidar los planes de clausura anteriores debido, por ejemplo, a la necesidad de estabilizar las estructuras, los sistemas y los componentes antes de poder desarrollar el nuevo plan de clausura. Los planes de clausura, la retirada de los restos de combustible y las opciones relativas al estado final definitivo del emplazamiento dependen de la naturaleza del accidente, y en ellos se tendrán en cuenta el estado de: los residuos nucleares, las partículas y los materiales radiactivos que sigan estando en las instalaciones; el combustible gastado y los restos de combustible almacenados; y los desechos radiactivos sólidos y el agua procesada almacenados [293]. Los intereses de otras partes obtenidos, por ejemplo, mediante un proceso adecuado de consulta pública, también influirán en la planificación y ejecución de la clausura.

Actualmente no es posible predecir el estado final de la central nuclear de Fukushima Daiichi [291]. Cabe señalar que ninguna de las tres centrales de otros lugares del mundo que han experimentado los daños más severos en el combustible en accidentes anteriores ha alcanzado aún el estado final definitivo de clausura completa [293] (recuadro 5.3).

Recuadro 5.3. Estado de la clausura de instalaciones nucleares dañadas

Las tres instalaciones de otros lugares que han experimentado los daños más severos en el combustible en accidentes anteriores son Windscale (Reino Unido), Three Mile Island (Estados Unidos de América) y Chernóbil (antigua Unión Soviética). Su estado al redactar el presente informe era el siguiente:

La pila de Windscale, dañada en un accidente en 1957, estaba en estado de servicio y mantenimiento, con un plan para someterla a almacenamiento seguro en los siguientes años, y su clausura definitiva estaba prevista para 2050 aproximadamente.

La unidad de la central nuclear de Three Mile Island dañada en 1979 estaba en modalidad de almacenamiento seguro y se preveía llevar a cabo su desmantelamiento completo y la restauración del emplazamiento en los 20 años siguientes.

La Unidad 4 de Chernóbil, que había sufrido un daño severo en el accidente de 1986, estaba en proceso de ser puesta en estado de almacenamiento seguro y su clausura definitiva estaba prevista para 2050 aproximadamente.

En la decisión definitiva sobre el estado final del emplazamiento de Fukushima Daiichi deberán tenerse en cuenta muchos factores, entre ellos el uso futuro del terreno, las posibles dosis de radiación para los trabajadores en las actividades de clausura, los desechos que se generarían y las opciones de acondicionamiento y disposición final de los desechos.

5.3. GESTIÓN DEL MATERIAL CONTAMINADO Y LOS DESECHOS RADIATIVOS

La estabilización de una central nuclear dañada y las actividades de descontaminación en el emplazamiento y de restauración en los alrededores dan lugar a grandes cantidades de material contaminado y de desechos radiactivos. En el emplazamiento se han generado grandes cantidades de material líquido y sólido contaminado, así como desechos radiactivos, a raíz de diversas actividades de recuperación.¹¹⁴ La gestión de este material —con sus diversas propiedades físicas, químicas y radiológicas— es compleja y requiere el despliegue de esfuerzos importantes.

Tras el accidente de Fukushima Daiichi, hubo dificultades para determinar lugares en los que almacenar las grandes cantidades de material contaminado generadas por las actividades de restauración fuera del emplazamiento. Se habían construido varios cientos de instalaciones de almacenamiento temporal en comunidades locales. Proseguían los esfuerzos para construir una instalación de almacenamiento provisional.

5.3.1. Gestión de los desechos

El terremoto y el tsunami generaron una gran cantidad de desechos (conocidos como ‘desechos del desastre’), algunos de los cuales quedaron contaminados (principalmente con ¹³⁴Cs y ¹³⁷Cs) como consecuencia de las emisiones de la central nuclear de Fukushima Daiichi. Debido a las actividades de estabilización en el emplazamiento ha aumentado el inventario de material contaminado y de desechos radiactivos sólidos y líquidos que es preciso gestionar, al mismo tiempo que las actividades de restauración fuera del emplazamiento han aumentado la cantidad de material contaminado.

¹¹⁴ La distinción entre el material contaminado y los desechos radiactivos depende de los radionucleidos y las concentraciones de actividad asociados con los materiales.

Recuadro 5.4. Desechos radiactivos

Los desechos radiactivos son materiales para los que no se prevé un uso posterior, cuyo contenido o concentración de radionucleidos es superior a un nivel especificado. La disposición final es el punto final reconocido internacionalmente de la gestión de los desechos radiactivos. No obstante, con frecuencia es necesario almacenar algunos desechos radiactivos durante períodos de decenas de años mientras se desarrollan instalaciones de disposición final. Ciertos tipos de desechos radiactivos (desechos radiactivos de actividad baja) pueden someterse a disposición final en instalaciones de disposición final de desechos ‘cerca de la superficie’.

La gestión (es decir, el tratamiento previo, el tratamiento, el acondicionamiento, el transporte, el almacenamiento y la disposición final futura) de grandes cantidades de desechos con propiedades físicas, químicas y radiológicas distintas plantea un desafío. Ha sido preciso desarrollar y/o modificar equipo, actividades e instalaciones en circunstancias más difíciles de lo habitual debido a la pérdida de infraestructura causada por el terremoto y el tsunami y los altos niveles de radiación. También fue necesario modificar la legislación y el enfoque nacional de la gestión de desechos [124, 266, 278, 294].

5.3.2. Actividades fuera del emplazamiento

La restauración fuera del emplazamiento se inició con el objetivo de reducir las exposiciones externas. Las medidas reparadoras comprendieron la retirada de la capa superficial del suelo y de vegetación, y la descontaminación de zonas públicas y residenciales. El tamaño de la zona que había de ser objeto de restauración se vio influido por los criterios radiológicos y los niveles de actuación adoptados, lo cual también repercutió en la cantidad de material contaminado que había que gestionar.

En general, un nivel de referencia bajo se traduce en la generación de una cantidad mayor de material contaminado. Se estima que la cantidad de suelo y otros materiales contaminados generados a raíz de las actividades de restauración posteriores al accidente será de aproximadamente 16 a 22 millones de m³ tras la reducción del volumen por incineración de plantas y árboles [273].

Las fases del proceso de gestión de desechos aplicado en la prefectura de Fukushima se ilustran en la figura 5.6. La gestión de los desechos generados en las actividades de restauración supone la acumulación de esos desechos en instalaciones de almacenamiento temporal cerca de los lugares de descontaminación. Se han construido muchos cientos de instalaciones de almacenamiento temporal. Tras este almacenamiento, los desechos se transportarán a la instalación de almacenamiento provisional. El nivel de contaminación de parte de este material es suficientemente bajo para poder utilizar la infraestructura existente de eliminación de desechos sólidos municipales (por ejemplo, los incineradores y los vertederos de desechos municipales). No obstante, ha resultado difícil obtener el acuerdo de los municipios para utilizar incineradores convencionales con el fin de reducir el volumen de material contaminado fuera del emplazamiento.

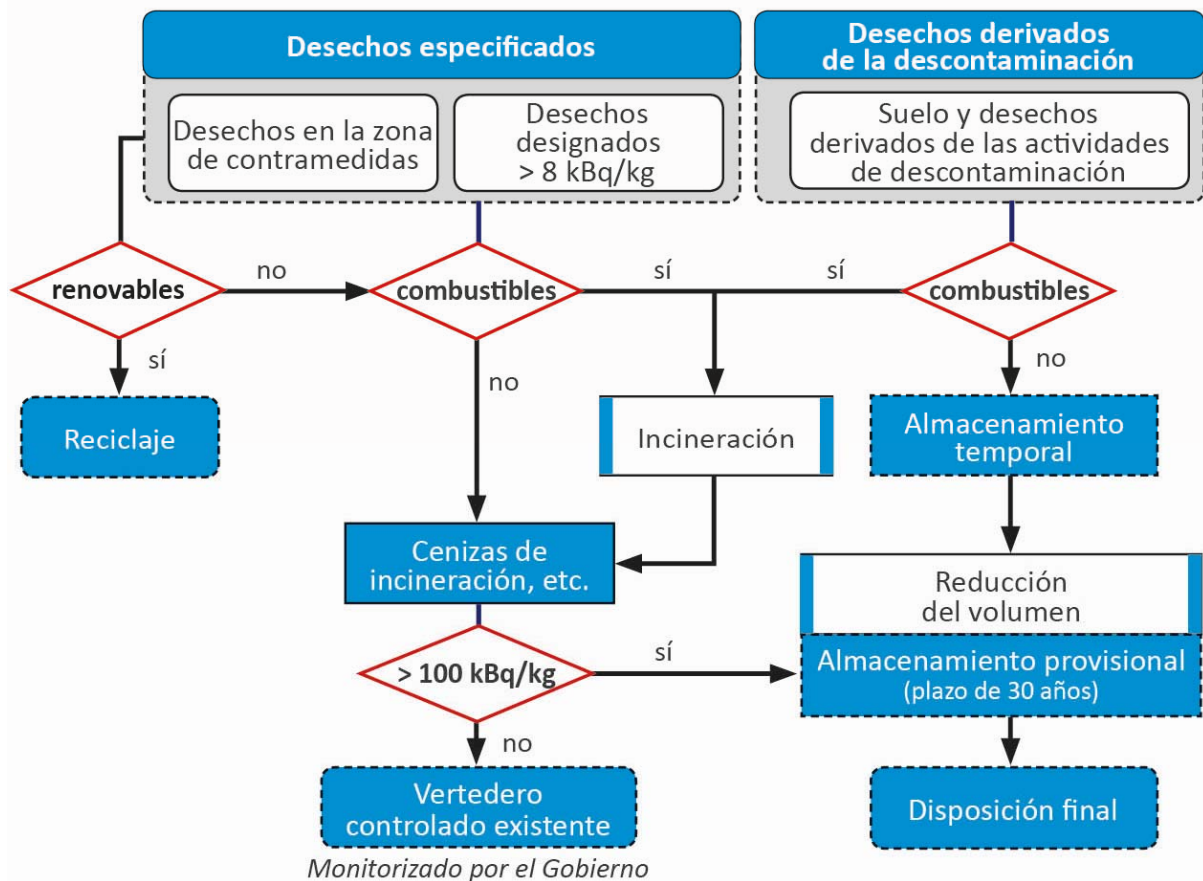


Fig. 5.6. Diagrama de flujo de la gestión de desechos especificados y desechos derivados de la descontaminación en la prefectura de Fukushima [295].

Se han producido retrasos en la selección de emplazamientos para las instalaciones de almacenamiento temporal y provisional. Uno de los factores que ha contribuido a esos retrasos fue la obtención del acuerdo de la población local. Sin embargo, tras las conversaciones mantenidas entre funcionarios gubernamentales nacionales y locales y los residentes y propietarios de tierras locales, el plan para la construcción de una instalación de almacenamiento provisional se aceptó en el pueblo de Okuma en diciembre de 2014 y en el pueblo de Futaba en enero de 2015. En enero de 2015, el Ministerio de Medio Ambiente confirmó los planes y disposiciones para el transporte a escala experimental de suelo contaminado a la instalación de almacenamiento provisional a partir de marzo de 2015 [273]; estos transportes comenzaron, a modo de prueba, el 13 de marzo de 2015.

5.3.3. Actividades en el emplazamiento

En la central nuclear de Fukushima Daiichi se han generado grandes cantidades de material líquido y sólido contaminado, así como desechos radiactivos, a raíz de diversas actividades de recuperación. Por ejemplo, al 30 de noviembre de 2014 había 131 900 m³ de escombros y 79 700 m³ de árboles almacenados en el emplazamiento [296, 297]. La generación de estas grandes cantidades de material contaminado y desechos radiactivos ha hecho necesario el establecimiento de estrategias efectivas de gestión de los desechos. En particular, ha sido preciso construir instalaciones de tratamiento y almacenamiento para muchos cientos de miles de metros cúbicos de agua contaminada y tratada, así como para desechos sólidos derivados de los procesos de tratamiento y la limpieza de grandes superficies de tierra. En la figura 5.7 se ilustra parte de la estrategia de gestión de los desechos del emplazamiento, comprendidas las instalaciones de tratamiento y almacenamiento de agua.

Persiste la necesidad de capacidad de almacenamiento para diversos tipos de corrientes de desechos sólidos y líquidos (figura 5.8). Por consiguiente, la reducción del volumen se ha convertido en un componente importante de la gestión de los desechos del emplazamiento, por ejemplo, mediante la evitación de desechos, la instalación de incineradores, y la reutilización y el reciclaje de materiales. Se prevé que la clausura de la central nuclear genere más desechos [298]. Los tipos y las cantidades de desechos generados dependerán del enfoque que se adopte.



Fig. 5.8. Vista aérea de la zona del emplazamiento donde se encuentran los depósitos de almacenamiento de agua [301].

Se han desplegado esfuerzos para alejar los desechos radiactivos de los límites del emplazamiento de modo que las tasas de dosis en esos lugares sean inferiores a 1 mSv/año. Estas actividades no tienen repercusiones en la exposición de la población, ya que no hay presencia humana en los límites del emplazamiento [299].

La gestión de desechos en el emplazamiento plantea muchos desafíos complejos que deben seguir siendo objeto de investigación y desarrollo. A medida que se disponga de nuevas capacidades, se deberá considerar una estrategia de disposición final de los desechos del emplazamiento que incluya decisiones a corto y a largo plazo [300].

5.4. REVITALIZACIÓN DE LAS COMUNIDADES Y PARTICIPACIÓN DE LOS INTERESADOS

El accidente nuclear y las medidas de protección radiológica introducidas tanto en la fase de emergencia como en la de recuperación después del accidente han tenido consecuencias importantes para la forma de vida de la población afectada. Las medidas de evacuación y reubicación y las restricciones al consumo de alimentos supusieron grandes privaciones para las personas afectadas. Los proyectos de revitalización y reconstrucción iniciados en la prefectura de Fukushima se basaron en la comprensión de las consecuencias socioeconómicas del accidente. Estos proyectos se centran en cuestiones como la reconstrucción de la infraestructura, la revitalización de las comunidades y el apoyo y la indemnización.

La comunicación con la población acerca de las actividades de recuperación es esencial para crear confianza. A fin de comunicar de forma eficaz, es necesario que los expertos entiendan las necesidades de información de la población afectada y faciliten información comprensible a través de medios pertinentes. La comunicación mejoró después del accidente y la población afectada fue participando cada vez más en la adopción de decisiones y en las medidas de restauración.

El accidente y las medidas protectoras implantadas tanto en la fase de emergencia como en la de recuperación incidieron en la forma de vida de la población de las zonas afectadas. Al 30 de enero de 2015, el número de evacuados giraba en torno a 119 000 personas, frente al máximo de alrededor de 164 000 alcanzado en junio de 2012. Las privaciones asociadas a la evacuación, la reubicación y las restricciones al consumo de alimentos son considerables [268, 269].

El terremoto, el tsunami y el accidente provocaron la destrucción, la degradación y el desuso de infraestructuras (escuelas, hospitales y empresas comerciales, entre otras), tuvieron repercusiones en la actividad empresarial y el comercio, y ocasionaron cambios demográficos debidos a la evacuación de grandes cantidades de personas. Según los informes, era más probable que las familias jóvenes siguieran evacuadas y que las personas mayores regresaran a sus hogares [302]. Los planes de recuperación y revitalización a escala nacional y local tienen en cuenta la importancia de la reconstrucción física y socioeconómica y abordan cuestiones como la reconstrucción de la infraestructura, el apoyo a las comunidades y la indemnización [269].

Entre los desafíos concretos a que se enfrentaban las personas que estaban en alojamientos temporales figuran una serie de cuestiones de bienestar general físico y mental asociadas a los altos niveles de desempleo y a las dificultades relacionadas con el alojamiento provisional [239]. Aunque se desconoce el número total preciso de evacuados en alojamientos temporales como consecuencia del terremoto, el tsunami y el accidente nuclear, para junio de 2013 se habían construido 16 800 viviendas temporales y casi 24 000 familias vivían en alojamientos alquilados por la administración de la prefectura [269]. Además, había planes para construir 2586 viviendas públicas permanentes hasta 2015 para las personas afectadas por el terremoto y el tsunami. Para los evacuados en la respuesta al accidente, se había planeado la construcción de 4890 viviendas públicas permanentes [283].

5.4.1. Consecuencias socioeconómicas

La evacuación dio lugar a la pérdida de granjas y empresas. Se dejó de pescar en un radio de 30 km alrededor del emplazamiento (que se redujo a 20 km al final de septiembre de 2011). Se han interrumpido las actividades agrícolas y otras actividades comerciales en una superficie de unos 700 km² fuera de la Zona Especial de Descontaminación [269, 303, 304].

Las consecuencias socioeconómicas en el sector agrícola y otras empresas se observaron también fuera de la Zona Especial de Descontaminación y de la Zona de Estudio Intensivo de la Contaminación. Además de la pérdida de empleos y de medios de subsistencia para los afectados, las restricciones al consumo de alimentos, las pérdidas por las exportaciones relacionadas con los alimentos y los bienes de consumo, los costos de monitorización para demostrar el cumplimiento de los criterios radiológicos y el pago de indemnizaciones a las personas afectadas también han tenido repercusiones. Las consecuencias socioeconómicas indirectas son las derivadas de la pérdida de la confianza de los consumidores, no solo en los productos alimenticios, sino también en los productos básicos y empresas de las zonas afectadas [269, 303, 305].

La combinación del terremoto, el tsunami y el accidente nuclear tuvo un efecto directo en la economía japonesa. Las exportaciones cayeron un 2,4 % en abril de 2011 en comparación con el nivel alcanzado en abril de 2010. Al mismo tiempo aumentaron las importaciones, especialmente las de combustibles, productos químicos y alimentos, lo que dio lugar a un déficit de la balanza comercial en abril y mayo de 2011 [303]. Cuando se redactó el presente informe las importaciones de combustibles fósiles seguían siendo superior a lo habitual [306].

Aunque en el momento del accidente el Japón no era parte en ninguna de las convenciones sobre responsabilidad civil por daños nucleares (se adhirió a la Convención sobre Indemnización Suplementaria por Daños Nucleares el 15 de enero de 2015), la legislación promulgada en 1961 era coherente con los principios básicos de la responsabilidad por daños nucleares consagrados en esas convenciones. En virtud de esa legislación, la TEPCO era responsable exclusiva de los daños nucleares causados por el accidente de Fukushima Daiichi [307]. Su responsabilidad en términos de importe era ilimitada. Después del accidente, ni el Gobierno ni el Parlamento eximieron a la TEPCO de responsabilidad por considerar que la cláusula de exención relativa a un desastre natural grave, según se especifica en la Ley de Indemnización por Daños Nucleares, no era aplicable en este caso. Se han puesto en práctica diversos medios para que la TEPCO pueda cumplir sus obligaciones respecto de las víctimas del accidente, entre ellas pagos provisionales de indemnizaciones como medida de emergencia, la prestación de apoyo financiero a la TEPCO por la Corporación de Indemnización por Daños Nucleares y Facilitación de la Clausura, y la conversión de esta en la accionista mayoritaria de la TEPCO. Además, la creación del Comité de Resolución de Controversias relativas a la Indemnización por Daños Nucleares y la publicación de directrices no vinculantes jurídicamente aportaron un mecanismo para alcanzar rápidamente acuerdos de indemnización por daños nucleares sin tener que acudir a los tribunales.

La política de indemnización establecida se aplica no solo a quienes recibieron la orden de evacuación, sino que también abarca los efectos en los medios de subsistencia y las formas de vida, la pérdida de beneficios debido a las restricciones y la pérdida de confianza de los consumidores, así como los cambios de infraestructura para quienes siguieron en la zona. Asimismo, existen disposiciones específicas para los padres con familias jóvenes y las embarazadas [308].

De conformidad con las directrices establecidas en diciembre de 2011, las personas que debieron ser evacuadas recibieron una indemnización del orden de 100 000 yen por persona y mes. Se abonará una indemnización adicional de unos 900 000 yen por persona a los que vuelvan a vivir a las zonas afectadas en el plazo de un año una vez levantada la orden de evacuación [309].

5.4.2. Revitalización

Se han puesto en práctica, con el apoyo gubernamental y local, una serie de iniciativas a fin de estimular la revitalización de la prefectura de Fukushima que incluyen la reconstrucción de la infraestructura, el alojamiento y el transporte. Algunas medidas se centran en la recuperación de la confianza de los consumidores en los productos, al mismo tiempo que se promueven el orgullo local y el turismo. Puesto que la disponibilidad de trabajo y empleo son también un factor clave para el regreso de los residentes (o el asentamiento de nuevas poblaciones), otras iniciativas se centran en la reconstrucción de empresas y la creación de nuevas oportunidades comerciales.

Las iniciativas de revitalización y las actividades de reconstrucción vinculadas a la recuperación abarcan desde el nivel del Gobierno nacional hasta el de las organizaciones no gubernamentales y las comunidades locales. El Gobierno del Japón creó un Organismo de Reconstrucción, la prefectura de Fukushima ha iniciado diversas actividades, comprendido el establecimiento del Centro de Creación Ambiental [234, 269], y la TEPCO creó en 2013 la Oficina Central de Revitalización de Fukushima. El objetivo de todos los proyectos es combinar las medidas de protección radiológica con aspectos sociales más amplios, como la revitalización de la infraestructura, la colaboración de la población y, en el caso de la Oficina Central de Revitalización, la indemnización [310].

Las medidas varían en distintos lugares de la prefectura, a menudo en función del compromiso de los dirigentes locales y las distintas dificultades dentro de la región. Un ejemplo de iniciativa de revitalización es la lograda cooperación entre los productores y los distribuidores de melocotones y la industria alimentaria para restablecer la confianza pública en los alimentos producidos en la prefectura de Fukushima [269, 311].

5.4.3. Participación de las partes interesadas y comunicación con ellas

Con el avance de las actividades de restauración y recuperación ha aumentado la participación de las partes interesadas y han mejorado las estrategias de consulta y participación. La respuesta al accidente ha ofrecido varios ejemplos que muestran las ventajas de dar participación a las poblaciones afectadas en las actividades de recuperación, desde la consulta y el diálogo hasta las medidas de restauración (denominadas medidas de autoayuda).

La comunicación abierta y eficaz con la población es una parte esencial de la revitalización. En enero de 2012 se inauguró en la ciudad de Fukushima un centro de información para la zona sobre la descontaminación (Plaza de Información sobre la Descontaminación), como proyecto conjunto de la prefectura de Fukushima y el Ministerio de Medio Ambiente [312].

Otras actividades de comunicación a escala local son la celebración de diálogos entre los expertos y la población y la presentación de consejos específicos en relación con las medidas de autoayuda. Estas medidas han contribuido a restablecer la comunicación con los residentes de Fukushima y a recuperar su confianza.

En la figura 5.9 se muestra un diagrama de flujo del proceso de puesta en práctica de la restauración y las interacciones conexas con los interesados. En todas las fases de la elaboración de planes y su aplicación se contó con la participación de los interesados y se mantuvieron consultas con ellos. En los casos de restauración de tierras de propiedad privada, antes de iniciar cualquier actividad de restauración es preciso tener el acuerdo de los propietarios.

En un accidente nuclear, los medios de comunicación, tanto tradicionales como nuevos, desempeñan una función importante en la comunicación con el público. El accidente de Fukushima Daiichi se caracterizó por un alto grado de cobertura de los medios de comunicación, mediante Internet, los medios sociales y, en la fase inicial, las emisiones continuas por radio y televisión. La cobertura del accidente duró varios meses y se centró principalmente en los problemas relacionados con el lugar del accidente, así como en las medidas protectoras adoptadas por las autoridades japonesas. Los medios

sociales intensificaron las informaciones sobre el suceso y difundieron las opiniones de particulares y de organizaciones no gubernamentales. Se dispuso de una cantidad considerable de información, de calidad variable y con distintos grados de credibilidad [310].

Los expertos en seguridad radiológica tuvieron que entender qué tipo de información estaba solicitando el público y facilitarla de forma comprensible. Las preguntas fundamentales de las comunidades afectadas y los medios de comunicación se centraron en saber qué grados de radiación son ‘inocuos’ [314].

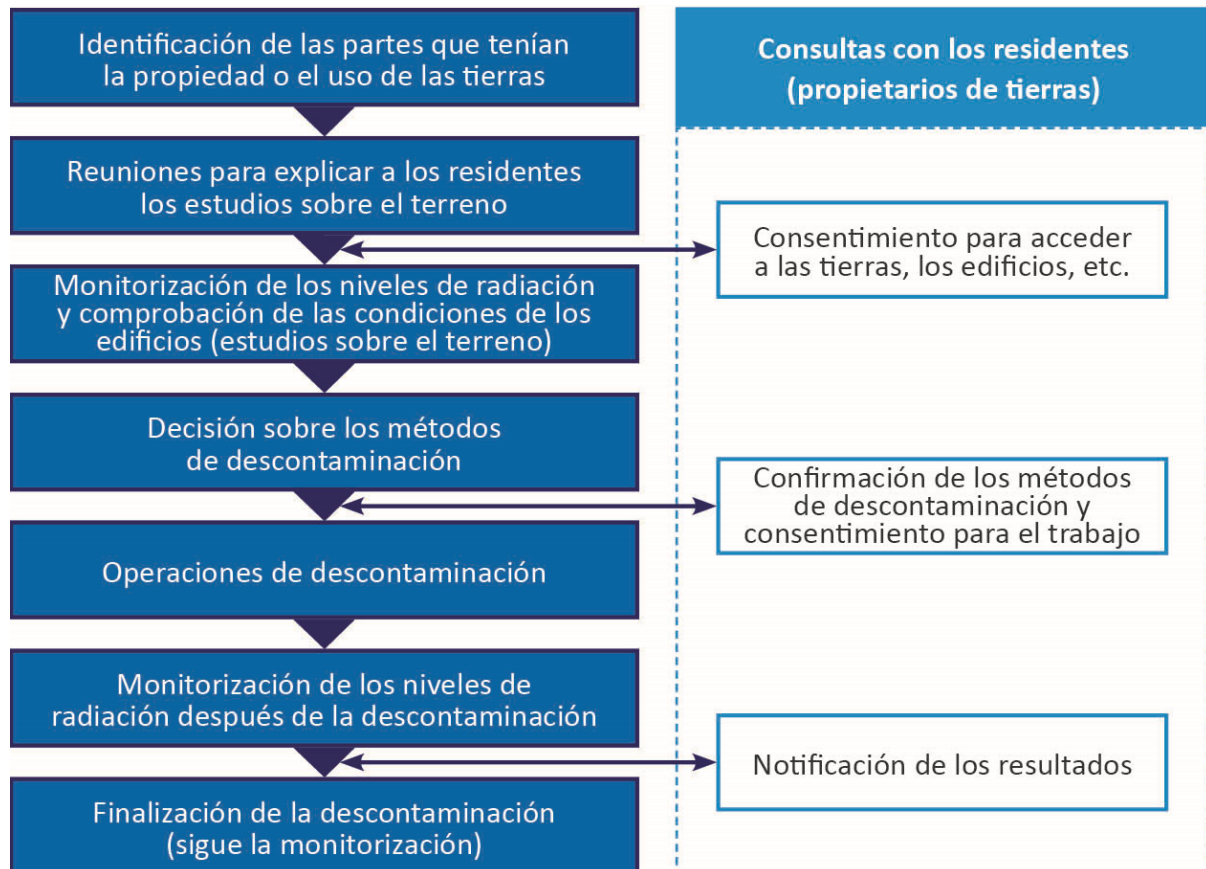


Fig. 5.9. Diagrama de flujo del proceso de restauración y de consulta con los residentes [313].

5.5. OBSERVACIONES Y LECCIONES APRENDIDAS

De la evaluación de las actividades posteriores al accidente se han desprendido varias observaciones y enseñanzas.

- **La planificación antes de un accidente para la recuperación después de este es necesaria para mejorar la toma de decisiones bajo presión en la situación inmediatamente posterior al accidente. Es preciso preparar con antelación las estrategias y medidas nacionales para la recuperación después del accidente a fin de poder poner en marcha un programa de recuperación general eficaz y apropiado si se produce un accidente nuclear. Esas estrategias y medidas deben incluir el establecimiento de un marco jurídico y regulador; estrategias y criterios de restauración genéricos para las dosis de radiación residuales y los niveles de contaminación; un plan de estabilización y clausura de las instalaciones nucleares dañadas; y una estrategia genérica de gestión de grandes cantidades de material contaminado y desechos radiactivos.**

Esas estrategias y medidas deben incluir lo siguiente:

- La creación de un marco jurídico y regulador que especifique las funciones y responsabilidades de las diversas instituciones que deberán participar. Ese marco debe abordar la restauración fuera del emplazamiento, la estabilización del emplazamiento y los preparativos para la clausura, la gestión del material contaminado y los desechos radiactivos, la revitalización de las comunidades y la participación de los interesados.
 - Estrategias y criterios de restauración genéricos (niveles de actuación de referencia y derivados) para las dosis de radiación residuales y los niveles de contaminación.
 - Un plan de estabilización de las condiciones en el emplazamiento de una instalación nuclear dañada y preparativos para su clausura.
 - La elaboración de una estrategia genérica para gestionar grandes cantidades de material contaminado y de desechos radiactivos, complementada con evaluaciones genéricas de la seguridad de las instalaciones de almacenamiento y disposición final.
 - Suficiente flexibilidad para que la gestión de las condiciones después del accidente se pueda adaptar en respuesta a los cambios en las condiciones y la información y la experiencia adquiridas.
- **Las estrategias de restauración deben tener en cuenta la eficacia y viabilidad de las distintas medidas y la cantidad de material contaminado que se generará en el proceso de restauración.** Una vez establecidos los niveles de referencia de las dosis de radiación residuales y los niveles de contaminación, es fundamental controlar cuidadosamente la cantidad de material contaminado que se genere en la aplicación de la estrategia de restauración a fin de reducir al mínimo la cantidad de desechos que haya que gestionar. La ausencia de preparativos para la recuperación tras un accidente nuclear en el Japón fue la causa de que, en un primer momento, se generaran grandes volúmenes de material potencialmente contaminado. A medida que fue pasando el tiempo y se avanzó en la planificación, se optimizaron las medidas de restauración y, en consecuencia, mejoró el control de la cantidad de desechos que se debían gestionar. Los proyectos piloto resultaron útiles para determinar la eficacia de técnicas de restauración concretas y la cantidad de desechos generados por técnicas particulares. También contribuyeron a establecer procedimientos para la protección radiológica de los trabajadores.
- **Como parte de la estrategia de restauración, es necesario aplicar pruebas y controles rigurosos de los alimentos para prevenir o reducir al mínimo las dosis por ingestión.** La aplicación sistemática de pruebas y controles rigurosos de los alimentos después del accidente demostró que las dosis por ingestión pueden mantenerse en niveles bajos. A fin de crear confianza en los alimentos de producción local, se crearon puntos de monitorización locales a los que las personas de las zonas afectadas pudieran llevar alimentos y medir la contaminación. Este control de las dosis por ingestión simplificó la recuperación al permitir que la restauración se centrara en técnicas que reducen las dosis externas.
- **Se precisa más orientación internacional sobre la aplicación práctica de las normas de seguridad relativas a la protección radiológica en situaciones de recuperación después de un accidente.** Se necesita más orientación práctica sobre la aplicación de las normas de seguridad del OIEA en las situaciones de exposición existentes. Los niveles de referencia adoptados para los primeros años después del accidente deben analizarse y modificarse periódicamente, según corresponda, en respuesta al cambio de las condiciones radiológicas. Las orientaciones deben incluir una metodología para seleccionar niveles de referencia específicos para el caso y el emplazamiento, expresados en términos de cantidades de dosis y cantidades derivadas, así como mecanismos para integrar el asesoramiento técnico y científico con otros factores socialmente pertinentes a fin de crear un proceso de adopción de decisiones coherente, transparente y colectivamente aceptado.
- **Tras un accidente, es esencial para la recuperación en el emplazamiento disponer de un plan estratégico destinado a mantener las condiciones estables a largo plazo y a clausurar las instalaciones dañadas en el accidente. El plan debe ser flexible y fácilmente adaptable a las condiciones cambiantes y a nuevas informaciones.** Los preparativos para la clausura de una instalación dañada en un accidente consistirían en primer lugar en la estabilización para garantizar la existencia de estructuras, sistemas y componentes a fin de mantener de forma fiable las condiciones estables a largo plazo, hasta que sus funciones ya no

se necesiten. Los preparativos para la clausura después de un accidente se prolongan durante decenios. Es necesario adoptar disposiciones para mantener los conocimientos especializados y la fuerza de trabajo necesarios durante todo ese período.

La adopción de decisiones sobre las fases de clausura provisional y sobre las condiciones finales del emplazamiento y de los reactores dañados debe incluir diálogos con las partes interesadas. La toma de decisiones sobre la clausura depende de las condiciones de los reactores dañados, el combustible y los restos, que no se pueden determinar en el período inmediatamente posterior al accidente. Los factores que se deben tener en cuenta en la adopción de decisiones son, entre otros: los niveles de dosis para los trabajadores que realicen actividades de clausura; los volúmenes y tipos de desechos generados; y los esfuerzos necesarios para el tratamiento de los desechos. En la fase inicial de las actividades de limpieza, no es realista predecir las condiciones finales del emplazamiento de la central, si bien en el proceso de toma de decisiones deben tenerse en cuenta las expectativas y los planes respecto del terreno.

- **La recuperación del combustible dañado y la caracterización y retirada de los restos de combustible precisan soluciones concebidas específicamente para el accidente, y quizás sea necesario desarrollar métodos e instrumentos especiales.**

Un accidente en un reactor en el que se produzcan daños en el combustible nuclear da lugar a condiciones particulares en ese reactor que son específicas de ese accidente. La retirada y gestión de los elementos combustibles dañados y de los restos del combustible fusionado son tareas complejas. La labor de caracterizar, retirar y embalar esos restos, y de almacenarlos hasta que se pueda proceder a su disposición final, debe realizarse en condiciones difíciles, en gran medida con altos niveles de radiación.

- **Las estrategias y medidas nacionales de recuperación después de un accidente deben incluir la elaboración de una estrategia genérica de gestión del material líquido y sólido contaminado y los desechos radiactivos, respaldadas por evaluaciones genéricas de la seguridad para la descarga, el almacenamiento y la disposición final.**

Se necesita una estrategia de gestión de los desechos para llevar a cabo la gestión previa a la disposición final (por ejemplo, la manipulación, el tratamiento, el acondicionamiento y el almacenamiento) de material contaminado y desechos radiactivos generados por un accidente. Esa estrategia también debe indicar vías adecuadas de disposición final de los materiales. Las estrategias de gestión de desechos podrían incluir el uso de instalaciones de procesamiento, almacenamiento y disposición final existentes, como incineradores o vertederos de lixiviado controlado. No obstante, quizás sean necesarios otros enfoques, en función de los volúmenes y las características de los desechos de que se trate. La elaboración de estas estrategias podría respaldarse con una justificación de la seguridad genérica.

También se necesitan estrategias para la gestión después de un accidente de grandes volúmenes de agua contaminada, incluida la posibilidad de su descarga controlada al medio ambiente. Aunque existe orientación internacional relativa a las descargas durante la explotación normal de las instalaciones nucleares, se precisa más orientación sobre su aplicación en situaciones posteriores a un accidente.

- **Es necesario reconocer las consecuencias socioeconómicas de cualquier accidente nuclear y de las medidas protectoras posteriores, y desarrollar proyectos de revitalización y reconstrucción que aborden cuestiones como la reconstrucción de la infraestructura, la revitalización de las comunidades y la indemnización.**

Los accidentes nucleares y las medidas protectoras y reparadoras adoptadas tanto en la fase de emergencia como en la de recuperación después del accidente, con el objetivo de reducir las dosis, tienen consecuencias de gran alcance en la forma de vida de la población afectada. La participación de los interesados en diversas fases de la restauración y la recuperación es fundamental.

- **El apoyo de las partes interesadas es esencial en todos los aspectos de la recuperación después del accidente. En particular, en los procesos de adopción de decisiones se precisa la participación de la población afectada para que la recuperación tenga éxito y sea aceptable y eficaz, y para revitalizar las comunidades. Un programa de recuperación eficaz requiere la**

confianza y la participación de la población afectada. Se debe crear confianza en la aplicación de las medidas de recuperación mediante procesos de diálogo, el suministro de información coherente, clara y oportuna, y la prestación de apoyo a la población afectada.

Los gobiernos deben proporcionar a la población una descripción realista de un programa de recuperación que sea coherente, claro y oportuno. Se deben utilizar diversos canales de información, comprendidos los medios sociales, para llegar a todos los grupos interesados.

La percepción de los riesgos radiológicos y las respuestas a las preguntas sobre los niveles de radiación ‘inocuos’ tienen muchas dimensiones, que incluyen la científica, la social y la ética. Es preciso comunicar claramente estas respuestas a las comunidades pertinentes en el marco de programas educativos — en lo posible, antes de que se produzca un accidente.

Es importante que la población afectada reciba apoyo para las actividades de recuperación locales. El apoyo a las medidas de autoayuda relacionadas con la restauración y para la reconstrucción de empresas puede traducirse en una mayor participación en el programa de recuperación y fomentar la confianza de la población afectada.

6. RESPUESTA DEL OIEA AL ACCIDENTE

En la presente sección se ofrece un panorama general de las principales actividades realizadas por el OIEA después del accidente de Fukushima Daiichi, tanto en la fase inmediatamente posterior como a más largo plazo. Esto incluye las actividades iniciales, las misiones del OIEA al Japón, las Conferencias Ministeriales sobre la Seguridad Nuclear y el Plan de Acción del OIEA.

El OIEA es el depositario de la Convención sobre Seguridad Nuclear, y su función es actuar como secretaria de las reuniones, convocándolas, preparándolas y prestándoles los servicios requeridos, y transmitiendo la información pertinente a las Partes Contratantes. En esta sección se presentan también las actividades relacionadas con las reuniones de las Partes Contratantes en la Convención sobre Seguridad Nuclear después del accidente de Fukushima Daiichi.

6.1. ACTIVIDADES DEL OIEA

6.1.1. Actividades iniciales

La responsabilidad de actuar ante una emergencia nuclear o radiológica y de proteger a los trabajadores, la población y el medio ambiente incumbe a la entidad explotadora, al nivel de la instalación de que se trate, y al Estado afectado, a los niveles local, regional y nacional.

El OIEA tiene una función central en el marco internacional¹¹⁵ para la preparación y respuesta en situaciones de emergencia. Esta función comprende: 1) la notificación y el intercambio de información oficial a través de los puntos de contacto designados oficialmente; 2) el suministro de información oportuna, clara y comprensible; 3) la prestación de asistencia internacional y su facilitación, cuando así se solicite; y 4) la coordinación de la respuesta interinstitucional.¹¹⁶

El OIEA cumple esta función por medio de su Sistema de Respuesta a Incidentes y Emergencias (IES). Este sistema incluye un punto de contacto activo las 24 horas del día y un centro de coordinación operacional, el Centro de Respuesta a Incidentes y Emergencias.

A las 6.42 horas UTC¹¹⁷ del 11 de marzo de 2011, el OIEA activó el Sistema de Respuesta a Incidentes y Emergencias al recibir una notificación de su Centro Internacional de Seguridad Sísmica. Esta notificación indicaba que había habido un terremoto, que era posible que hubiera daños en cuatro centrales nucleares¹¹⁸ de la costa nororiental del Japón y que existía el riesgo de un tsunami [143]. A las 7.21 horas UTC, el OIEA estableció la primera comunicación con el punto de contacto oficial designado por el Japón en virtud de la Convención sobre Pronta Notificación y de la Convención sobre Asistencia.

¹¹⁵ En el momento del accidente, el marco internacional para la preparación y respuesta en situaciones de emergencia consistía en: a) acuerdos e instrumentos jurídicos internacionales, en particular la Convención sobre la Pronta Notificación de Accidentes Nucleares (Convención sobre Pronta Notificación) y la Convención sobre Asistencia en Caso de Accidente Nuclear o Emergencia Radiológica (Convención sobre Asistencia); b) las normas de seguridad del OIEA y su orientación técnica sobre la preparación y respuesta en situaciones de emergencia; y c) las herramientas y disposiciones operacionales internacionales, en particular el Manual sobre operaciones técnicas para la notificación y asistencia en situaciones de emergencia (ENATOM), la Red de Respuesta y Asistencia (RANET) del OIEA y el Plan Conjunto de las Organizaciones Internacionales para la Gestión de Emergencias Radiológicas (Plan Conjunto).

¹¹⁶ El principal órgano de coordinación en las emergencias nucleares y radiológicas es el Comité Interinstitucional sobre Emergencias Radiológicas y Nucleares (IACRNE). Este órgano se estableció tras el accidente de Chernóbil, en 1986, y actualmente comprende 18 organizaciones internacionales. Una de las principales funciones del IACRNE es elaborar y mantener el Plan Conjunto de las Organizaciones Internacionales para la Gestión de Emergencias Radiológicas (el Plan Conjunto de 2010, en el momento del accidente).

¹¹⁷ Tiempo universal coordinado, nueve horas menos que la hora del Japón.

¹¹⁸ Fukushima Daiichi y Fukushima Daini de la Compañía de Energía Eléctrica de Tokio (TEPCO), Onagawa (Compañía de Energía Eléctrica de Tohoku) y Tokai (Compañía de Energía Atómica del Japón).

En los primeros días tras el accidente se hizo evidente que los reactores y el combustible presente en las piscinas de combustible gastado de la central nuclear de Fukushima Daiichi corrían el riesgo de sufrir un daño severo. Por consiguiente, el OIEA estableció grupos para que evaluaran las cuestiones de seguridad nuclear y radiológica más importantes. Los Laboratorios del OIEA¹¹⁹ examinaron los datos ambientales proporcionados por las autoridades japonesas sobre la monitorización del medio marino, y recibieron muestras del medio terrestre para realizar un análisis independiente.

El Director General del OIEA visitó Tokio del 17 al 19 de marzo para celebrar consultas de alto nivel, expresar la solidaridad de la comunidad internacional y su pleno apoyo al Japón para hacer frente a las consecuencias del terremoto, el tsunami y el accidente nuclear, y transmitir los ofrecimientos de asistencia de más de una decena de países. El Director General examinó también la posibilidad de que el OIEA prestara o coordinara algunos tipos específicos de asistencia, como misiones de expertos y misiones investigadoras, y subrayó la importancia de la transparencia y el suministro oportuno de información oficial por parte del Japón.

El 28 de marzo, en una reunión informativa especial sobre el accidente destinada a los Estados Miembros del OIEA, el Director General anunció la celebración de una Conferencia del OIEA sobre Seguridad Nuclear de alto nivel, que tendría lugar en Viena antes del verano. El Director General declaró que era de vital importancia que se extrajeran las enseñanzas adecuadas de lo que había ocurrido el 11 de marzo y en los días siguientes, para fortalecer la seguridad nuclear en todo el mundo [315].

Entre el 18 de marzo y el 18 de abril, a petición del Japón, el OIEA envió a ese país cuatro grupos de monitorización radiológica para que ayudaran a validar los resultados de las mediciones más amplias hechas por las autoridades japonesas. Los grupos realizaron mediciones en varios lugares dentro y fuera de la zona de evacuación de 20 km de radio en torno a la central nuclear de Fukushima Daiichi y en las cercanías de Tokio. Un funcionario superior del OIEA fue enviado al Japón para que coordinara las actividades pertinentes del OIEA y transmitiera los ofrecimientos de asistencia de los Estados Miembros a las autoridades japonesas. También se enviaron oficiales de enlace del OIEA a Tokio para facilitar y mejorar la comunicación con el órgano regulador del Japón, que en esa época era el OSNI.

Del 26 al 31 de marzo visitó el Japón un Grupo Mixto de Evaluación de la Inocuidad de los Alimentos del OIEA y la FAO. El grupo prestó asesoramiento y asistencia a las autoridades, a nivel nacional y local, sobre cuestiones técnicas relacionadas con la inocuidad de los alimentos y las contramedidas agrícolas. Se proporcionó asesoramiento sobre las estrategias de muestreo y análisis y sobre la interpretación de los datos de monitorización, para que pudieran ofrecerse actualizaciones continuas y fiables sobre el alcance de la contaminación de los alimentos en las zonas afectadas. Las autoridades japonesas utilizaron estos datos para elaborar estrategias de mitigación y restauración.

El 3 de abril de 2011 viajó al Japón un grupo de expertos del OIEA en reactores de agua en ebullición, que concluyó su labor el 12 de abril. El grupo recorrió los emplazamientos de Fukushima Daiichi y Fukushima Daini, conversando con el personal de las plantas para comprender mejor el accidente, las medidas de mitigación adoptadas hasta ese momento y las razones que habían motivado las principales decisiones que se habían adoptado. Los expertos celebraron también reuniones con el personal de varias oficinas gubernamentales y tuvieron conversaciones técnicas detalladas con la TEPCO y el OSNI en Tokio.

La primera declaración del OIEA sobre el accidente se hizo pública menos de tres horas después del terremoto del 11 de marzo, y ese mismo día se emitieron otras cinco declaraciones para transmitir información recibida del Japón. Hasta el 22 de abril de 2011 se publicaron más de 120 actualizaciones. Entre el 14 de marzo y el 2 de junio de 2011 el OIEA organizó 16 conferencias de

¹¹⁹ Los Laboratorios del OIEA, situados en Seibersdorf (Austria) y en Mónaco, están especializados en la evaluación de muestras de los medios terrestre y marino, respectivamente.

prensa, sin contar las celebradas durante la visita del Director General al Japón. Las actividades de información pública del OIEA incluyeron también la respuesta a miles de llamadas telefónicas y la provisión de respuestas técnicas detalladas a centenares de preguntas de los medios de comunicación.

El OIEA colocó diariamente en su sitio web público sesiones informativas para los Estados Miembros y el público, sobre el estado de las Unidades 1 a 6 de la central nuclear de Fukushima Daiichi; los datos de la monitorización radiológica relativos a radionucleidos tales como el ^{131}I , el ^{134}Cs y el ^{137}Cs ; los resultados de la monitorización radiológica de los alimentos e información sobre las restricciones vigentes para la distribución y el consumo de alimentos y de agua potable; y los datos de monitorización del medio marino. También ofreció sesiones informativas sobre el accidente a las Misiones Permanentes de los Estados Miembros del OIEA en Viena.

6.1.2. Misiones del OIEA al Japón

Sobre la base de un acuerdo con el Gobierno del Japón, expertos del OIEA y de los Estados Miembros realizaron una misión investigadora internacional del 24 de mayo al 2 de junio de 2011. La misión reunió información para una evaluación preliminar del accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi y de lo ocurrido en otros emplazamientos (Fukushima Daini y Tokai Daini). Además, determinó las cuestiones genéricas de seguridad relacionadas con sucesos naturales que era preciso estudiar o evaluar más a fondo sobre la base de las normas de seguridad del OIEA.

El ámbito de la misión comprendía los sucesos externos de origen natural; la evaluación de la seguridad de las centrales y la aplicación de la defensa en profundidad; la respuesta de las centrales tras un terremoto y un tsunami; la gestión de los accidentes severos; la gestión del combustible gastado en una instalación severamente degradada; la preparación y respuesta en situaciones de emergencia; y las consecuencias radiológicas. Los resultados de la misión [334] se plasmaron en 15 conclusiones y 16 lecciones aprendidas, que se comunicaron a la Conferencia Ministerial del OIEA sobre Seguridad Nuclear en junio de 2011.

Las otras misiones del OIEA al Japón se resumen en el cuadro 6.1.

Atendiendo a la recomendación formulada por la segunda misión de clausura, se iniciaron proyectos encaminados a aumentar la transparencia y proporcionar evaluaciones independientes de la monitorización del medio ambiente marino por el Japón. En los Laboratorios del OIEA para el Medio Ambiente situados en Mónaco se llevaron a cabo pruebas de competencia para controlar el desempeño y las capacidades analíticas de los laboratorios participantes. Los resultados del programa de monitorización marina se actualizan regularmente en el sitio web del OIEA.

6.1.3. Conferencia Ministerial del OIEA sobre Seguridad Nuclear

En junio de 2011, el Director General convocó una Conferencia Ministerial sobre Seguridad Nuclear en la Sede del OIEA con el objetivo de fortalecer la seguridad nuclear sacando provecho de las enseñanzas extraídas del accidente. La Conferencia brindó la oportunidad de realizar una evaluación preliminar del accidente a nivel ministerial y de las instancias técnicas superiores. También se examinaron medidas para mejorar la seguridad, cuestiones relativas a la preparación y respuesta en situaciones de emergencia, y las repercusiones para el marco global de seguridad nuclear.

El resultado fue una Declaración Ministerial sobre Seguridad Nuclear [320], en que se señalaron varias medidas para mejorar aún más la seguridad nuclear, la preparación para emergencias y la protección radiológica de las personas y el medio ambiente en todo el mundo. También se expresó el firme compromiso de los Estados Miembros del OIEA de velar por que esas medidas se llevaran a efecto. Las medidas más importantes eran: reforzar las normas de seguridad del OIEA; examinar sistemáticamente la seguridad de todas las centrales nucleares, entre otras cosas ampliando el programa de exámenes por expertos homólogos del OIEA; mejorar la eficacia de los órganos reguladores nucleares nacionales y garantizar su independencia; fortalecer el sistema mundial de

preparación y respuesta en situaciones de emergencia; y ampliar la función del OIEA de recibir y difundir información. En la Declaración Ministerial se solicitó asimismo al Director General que preparara un proyecto de Plan de Acción del OIEA sobre Seguridad Nuclear en consulta con los Estados Miembros.

CUADRO 6.1. MISIONES DEL OIEA AL JAPÓN

Fecha	Misión	Objetivos
7 a 15 de oct. de 2011	Misión internacional sobre la restauración de grandes zonas contaminadas fuera del emplazamiento de la central nuclear de Fukushima Daiichi [316]	Prestar asistencia al Japón en sus planes para la restauración de grandes zonas contaminadas por el accidente. Examinar las estrategias, planes y actividades de restauración que estaban en curso en el Japón, incluida la cartografía de la contaminación. Dar a conocer las conclusiones a la comunidad internacional, para difundir las lecciones aprendidas del accidente.
23 a 31 de ene. de 2012	Misión de examen del enfoque aplicado por el OSNI para las evaluaciones integrales de la seguridad de las instalaciones de reactores de potencia existentes [317]	Examinar (a petición del Gobierno del Japón) las evaluaciones integrales de la seguridad de las instalaciones de reactores de potencia realizadas por el OSNI y los resultados de las evaluaciones del titular de las licencias.
30 de jul. a 11 de ago. de 2012	Misión del OIEA a la central nuclear de Onagawa para examinar el comportamiento de los sistemas, estructuras y componentes después del gran terremoto y tsunami del Japón oriental [318]	Examinar el comportamiento de los sistemas, estructuras y componentes después del terremoto y el tsunami.
15 a 22 de abr. de 2013	Examen internacional por homólogos de la Hoja de ruta a medio y largo plazo para la clausura de las Unidades 1 a 4 de la central nuclear de Fukushima Daiichi de la TEPCO (primera misión) [319]	Examinar la ‘Hoja de ruta para la clausura’; los desafíos; el estado de los reactores; la gestión de los desechos; la protección de los empleados; y la integridad estructural de los edificios de los reactores y de otras estructuras.
14 a 21 de oct. de 2013	Misión internacional de seguimiento sobre la restauración de grandes zonas contaminadas fuera del emplazamiento de la central nuclear de Fukushima Daiichi [265]	Evaluar los progresos realizados en los trabajos de restauración en curso en el Japón y prestar asesoramiento sobre los aspectos problemáticos de la restauración.
6 a 12 de nov. de 2013	Visita de expertos sobre la monitorización marina	Observar la toma de muestras de agua de mar y el análisis de datos en Fukushima (7 y 8 de noviembre de 2013) y reunirse con las autoridades competentes del Japón en Tokio para recopilar información sobre la monitorización marina realizada por el Japón en el marco de su Plan de Monitorización de la Zona Marina.
25 de nov. a 4 de dic. de 2013	Examen internacional por homólogos de la Hoja de ruta a medio y largo plazo para la clausura de las Unidades 1 a 4 de la central nuclear de Fukushima Daiichi de la TEPCO (segunda misión) [288]	Examinar la ‘Hoja de ruta para la clausura’ actualizada; la retirada del combustible gastado de las piscinas de almacenamiento; la gestión del agua contaminada; la gestión de los desechos; y la monitorización marina.
10 a 16 de sep. y 4 a 14 de nov. de 2014	Misión de expertos sobre el fomento de la confianza en la monitorización marina y la garantía de la calidad de los datos	Examinar en particular la disponibilidad de resultados de la monitorización marina.
8 a 15 de feb. de 2015	Examen internacional por homólogos de la Hoja de ruta a medio y largo plazo para la clausura de las Unidades 1 a 4 de la central nuclear de Fukushima Daiichi de la TEPCO (tercera misión) [289]	Examinar la aplicación de la ‘Hoja de ruta para la clausura’; la gestión del agua contaminada; la entrada de agua subterránea; la retirada del combustible gastado y de los residuos de combustible; y cuestiones institucionales y de organización.

6.1.4. Plan de Acción del OIEA sobre Seguridad Nuclear

El proyecto de Plan de Acción del OIEA sobre Seguridad Nuclear fue aprobado por la Junta de Gobernadores en septiembre de 2011. Después de ello, el Plan de Acción se presentó a la reunión ordinaria de la Conferencia General del OIEA de 2011, donde fue refrendado unánimemente por los Estados Miembros [144]. Posteriormente, la Conferencia General instó a la Secretaría del OIEA y a los Estados Miembros a que aplicaran las medidas como prioridad principal, en forma completa y coordinada [321].

Las actividades previstas en el Plan de Acción comenzaron inmediatamente después de su aprobación. La ejecución plena y eficaz de las actividades de este plan exigió los esfuerzos conjuntos y el compromiso pleno de la Secretaría del OIEA, los Estados Miembros y otras partes interesadas.

Desde la aprobación del Plan de Acción se han logrado importantes progresos en varias esferas esenciales, como las evaluaciones de las vulnerabilidades de las centrales nucleares en materia de seguridad; el fortalecimiento de los servicios de examen por homólogos del OIEA; el examen y, en los casos necesarios, la revisión de las normas de seguridad pertinentes del OIEA; las mejoras de la capacidad de preparación y respuesta en situaciones de emergencia; la creación de capacidad; y la mejora de la comunicación y el intercambio de información con los Estados Miembros, las organizaciones internacionales y el público. Se han presentado informes regulares a la Junta de Gobernadores y a la Conferencia General del OIEA sobre los progresos realizados [322 a 324].

En la resolución por la que se aprobó el Plan de Acción se amplió la función del OIEA en la respuesta a una emergencia nuclear, que ahora comprende el suministro a los Estados Miembros, a las organizaciones internacionales y al público en general información oportuna, clara, correcta, objetiva y fácil de comprender sobre las posibles consecuencias de la emergencia. Esto debe incluir un análisis de la información disponible y un pronóstico de los posibles escenarios sobre la base de los datos obtenidos, los conocimientos científicos y las capacidades de los Estados Miembros.

Se organizaron varias reuniones de expertos internacionales sobre diferentes áreas de la seguridad para analizar los aspectos técnicos y extraer las enseñanzas del accidente de Fukushima Daiichi. El OIEA publicó informes sobre estos aspectos fundamentales de la seguridad, incluidos los resultados de las reuniones de expertos internacionales (véase el cuadro 6.2).

En 2013 se elaboraron informes sobre los temas siguientes:

- Preparación y respuesta en situaciones de emergencia radiológica o nuclear a la luz del accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi, sobre la base de una serie de reuniones técnicas celebradas en 2012-2013 [327].
- Fortalecimiento de la eficacia reguladora a la luz del accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi, sobre la base de los resultados de la Conferencia Internacional sobre Sistemas de Reglamentación Nuclear Eficaces, Ottawa (Canadá), 2013 [328].

6.1.5. Cooperación con la prefectura de Fukushima

En diciembre de 2012 se firmó un memorando de cooperación entre el OIEA y la Prefectura de Fukushima [329]. Sobre la base de este memorando, se suscribieron luego acuerdos prácticos de cooperación en las áreas de la monitorización radiológica y la restauración [330], la salud humana [331] y la preparación y respuesta en situaciones de emergencia [332], con la Prefectura de Fukushima, la Universidad Médica de Fukushima y el Ministerio de Relaciones Exteriores del Japón, respectivamente.

En mayo de 2013 se designó un Centro de creación de capacidad de la Red de Respuesta y Asistencia (RANET) del OIEA en la ciudad de Fukushima. El Centro se utiliza para una variedad de actividades del OIEA que tienen por objeto aumentar la capacidad de preparación y respuesta en situaciones de emergencia, en el Japón y en el resto del mundo. Se han celebrado en él varios talleres de capacitación, dedicados a la monitorización durante una emergencia radiológica y nuclear, la notificación, la presentación de informes y la solicitud de asistencia, y la preparación y respuesta en situaciones de emergencia.

CUADRO 6.2. REUNIONES DE EXPERTOS INTERNACIONALES (REI)

Fecha	Título	Objetivos centrales:
19 a 22 de mar. de 2012	REI 1: Seguridad de los reactores y del combustible gastado a la luz del accidente de la central nuclear de Fukushima Daiichi [42]	Analizar los aspectos técnicos; comprender las causas básicas; compartir las enseñanzas extraídas del accidente.
18 a 20 de jun. de 2012	REI 2: Aumento de la transparencia y la eficacia de las comunicaciones en caso de emergencia nuclear o radiológica [314]	Determinar y analizar las lecciones aprendidas del accidente y examinar las prácticas óptimas para mejorar la difusión de información.
4 a 7 de sep. de 2012	REI 3: Protección contra terremotos y tsunamis extremos a la luz del accidente de la central nuclear de Fukushima Daiichi [325]	Compartir las lecciones aprendidas; intercambiar información y determinar las cuestiones que debían investigarse más a fondo con respecto a: la evaluación del peligro sísmico y de tsunamis, los problemas especiales generados por las inundaciones, las incertidumbres relacionadas con las evaluaciones de los peligros, los métodos para establecer los valores de diseño, la forma de hacer frente a los sucesos que sobrepasan la base de diseño, y la seguridad frente a los terremotos y tsunamis.
28 de ene. a 1 de feb. de 2013	REI 4: Clausura y restauración después de un accidente nuclear [293]	Examinar los problemas a corto y largo plazo para la clausura de instalaciones dañadas en accidentes, la gestión de los desechos radiactivos resultantes de un accidente nuclear, y la restauración del entorno fuera del emplazamiento.
21 a 24 de mayo de 2013	REI 5: Factores humanos y organizativos de la seguridad nuclear a la luz del accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi [67]	Estudiar las formas de mejorar la cultura de la seguridad nuclear en una serie de instituciones clave, como los órganos reguladores y las organizaciones explotadoras.
17 a 21 de feb. de 2014	REI 6: Protección radiológica después del accidente de Fukushima Daiichi: Fomento de la confianza y la comprensión [326]	Examinar en particular los problemas relacionados con la protección radiológica que habían quedado de manifiesto en el accidente de Fukushima Daiichi y la forma de abordarlos a nivel nacional e internacional.
17 a 20 mar. de 2014	REI 7: Gestión de accidentes severos a la luz del accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi	Reunir y compartir los conocimientos y experiencias adquiridos con el accidente de Fukushima Daiichi respecto de la gestión de accidentes severos; determinar las lecciones aprendidas y las prácticas óptimas.
16 a 20 de feb. de 2015	REI 8: Mejora de la eficacia de la investigación y el desarrollo a la luz del accidente de la central nuclear de Fukushima Daiichi	Facilitar el intercambio de la información dimanante de las nuevas actividades de I+D realizadas por los Estados Miembros del OIEA, así como por la Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE (AEN de la OCDE) y otras organizaciones internacionales que se ocupan de accidentes severos en centrales nucleares, incluidos los que afectan a las piscinas de combustible gastado; fortalecer aún más la colaboración internacional entre los Estados Miembros y las organizaciones internacionales.
20 a 24 de abr. de 2015	REI 9: Evaluación y pronóstico en respuesta a una emergencia nuclear o radiológica	Facilitar el intercambio de información oportuna, clara y correcta durante una emergencia nuclear o radiológica y sobre sus posibles consecuencias, incluido el análisis de la información disponible y el pronóstico de los escenarios posibles sobre la base de los datos obtenidos, los conocimientos científicos y las capacidades de los Estados Miembros.

6.1.6. Conferencia Ministerial de Fukushima sobre Seguridad Nuclear

En diciembre de 2012, el Gobierno del Japón organizó una Conferencia Ministerial en la Prefectura de Fukushima, copatrocinada por el OIEA, con el objetivo principal de contribuir a fortalecer la seguridad nuclear en todo el mundo [333]. La Conferencia brindó la oportunidad de compartir con la comunidad internacional los nuevos conocimientos y enseñanzas extraídos del accidente, y de examinar los progresos logrados en los esfuerzos internacionales para reforzar la seguridad nuclear, incluidos los avances en la aplicación del Plan de Acción.

Los debates versaron sobre los niveles de radiación en Fukushima Daiichi, los desafíos relacionados con la clausura y la restauración después del accidente, y el grado de daño y recuperación en las zonas aledañas a la central. La Conferencia puso de relieve la importancia de adoptar medidas basadas en información científica y objetiva cuando se produce una emergencia nuclear o radiológica, y de aumentar la cooperación internacional.

6.2. REUNIONES DE LAS PARTES CONTRATANTES EN LA CONVENCION SOBRE SEGURIDAD NUCLEAR

Recuadro 6.1. Convención sobre Seguridad Nuclear

La Convención sobre Seguridad Nuclear fue aprobada en Viena el 17 de junio de 1994 [334]. Es el primer tratado internacional jurídicamente vinculante que se ocupa de la seguridad de las instalaciones nucleares (las centrales nucleares civiles en tierra) y tiene los siguientes objetivos: lograr y mantener un elevado nivel de seguridad nuclear en todo el mundo; establecer y mantener defensas eficaces contra los posibles peligros radiológicos para proteger a las personas, a la sociedad y al medio ambiente; y prevenir los accidentes con consecuencias radiológicas y mitigar tales consecuencias en caso de que se produzcan. La Convención entró en vigor el 24 de octubre de 1996. Al mes de marzo de 2015 contaba con 77 Partes Contratantes.

Las obligaciones de las Partes Contratantes se basan en gran medida en los principios ahora recogidos en los Principios fundamentales de seguridad del OIEA (SF-1) [335]. Esas obligaciones se refieren, en particular a: la selección del emplazamiento, el diseño, la construcción y la explotación de las instalaciones nucleares; el establecimiento y mantenimiento de un marco legislativo y regulador; el establecimiento de un órgano regulador dotado de la autoridad, la competencia y los recursos financieros y humanos que correspondan; la disponibilidad de recursos financieros y humanos adecuados para respaldar la seguridad de las instalaciones nucleares; la evaluación y verificación de la seguridad; la garantía de la calidad; y la preparación para emergencias.

Las Partes Contratantes deben presentar un informe sobre las medidas que hayan adoptado para dar cumplimiento a cada una de las obligaciones derivadas de la Convención. Esos informes se estudian en reuniones de examen de las Partes Contratantes que se celebran cada tres años bajo los auspicios del OIEA.

6.2.1. Reunión Extraordinaria de las Partes Contratantes en la Convención sobre Seguridad Nuclear

En la Quinta Reunión de Examen de las Partes Contratantes en la Convención sobre Seguridad Nuclear, celebrada del 4 al 14 de abril de 2011, las Partes aprobaron una declaración en la que, entre otras cosas, reafirmaron su adhesión a los objetivos de la Convención. Las Partes Contratantes acordaron celebrar una reunión extraordinaria para examinar y debatir los análisis iniciales del accidente y la eficacia de la Convención.

La Reunión Extraordinaria se celebró en la Sede del OIEA, en Viena, del 27 al 31 de agosto de 2012. Las Partes Contratantes examinaron los siguientes temas: los sucesos externos; las cuestiones relacionadas con el diseño; la gestión de accidentes severos y la recuperación (en el emplazamiento); las organizaciones nacionales; la preparación y respuesta en situaciones de emergencia; la gestión después del accidente (fuera del emplazamiento); y la cooperación internacional.

Las Partes Contratantes acordaron también por consenso adoptar varias medidas concretas para mejorar la eficacia del proceso de examen por homólogos. Los tres documentos de orientación fundamentales¹²⁰ de la Convención se enmendaron con el fin de aumentar la transparencia del proceso de examen, alentar a las Partes Contratantes a que se remitieran a las normas de seguridad del OIEA en sus informes nacionales, y fortalecer los esfuerzos por lograr una mejora continua mediante revaluaciones periódicas de la seguridad, llevando a cabo exámenes periódicos de la seguridad o por otros métodos.

Se estableció un Grupo de Trabajo sobre la Eficacia y la Transparencia para que en la Sexta Reunión de Examen de las Partes Contratantes presentara un informe acerca de las nuevas medidas que podrían adoptarse para reforzar la Convención sobre Seguridad Nuclear, junto con propuestas para enmendarla, si fuera necesario. Las Partes Contratantes examinaron también una lista de objetivos orientados a la adopción de medidas para el fortalecimiento de la seguridad nuclear, que se adjuntó al Informe resumido de la Reunión Extraordinaria [339].

6.2.2. Sexta Reunión de Examen de las Partes Contratantes en la Convención sobre Seguridad Nuclear

La Sexta Reunión de Examen de las Partes Contratantes en la Convención sobre Seguridad Nuclear se celebró del 24 de marzo al 4 de abril de 2014. En una sesión especial de la reunión, las Partes Contratantes informaron sobre las medidas aplicadas a la luz del accidente de Fukushima Daiichi. Se observó que, si bien la seguridad nuclear y las disposiciones para la preparación y respuesta en situaciones de emergencia habían mejorado, aún quedaba trabajo por hacer. Se estaban mejorando aún más los marcos de seguridad nacionales, mediante medidas para asegurar la independencia efectiva de los órganos reguladores y actualizar la reglamentación. La cooperación internacional también había aumentado, con una mayor participación en los exámenes por homólogos y el intercambio de información [340].

Las Partes Contratantes en la Convención sobre Seguridad Nuclear informaron sobre la aplicación de mejoras de la seguridad, tales como: la introducción de medios adicionales para soportar una pérdida prolongada de energía eléctrica y de refrigeración; la mejora de los sistemas de suministro de electricidad para aumentar la fiabilidad; la reevaluación de los peligros naturales externos en cada emplazamiento y de los sucesos que podían afectar a varias unidades; el mejoramiento de los centros de control de emergencias dentro y fuera de los emplazamientos para asegurar la protección contra los sucesos externos extremos y los peligros radiológicos; el fortalecimiento de las medidas para preservar la integridad de la contención; y la mejora de las disposiciones y directrices para la gestión de accidentes severos.

Las Partes Contratantes aprobaron asimismo propuestas para modificar nuevamente los documentos de orientación fundamentales de la Convención y formularon recomendaciones sobre medidas que deberían adoptar la Secretaría del OIEA, las Partes Contratantes y otras organizaciones.

Por último, las Partes Contratantes decidieron por votación convocar, en el plazo de un año, una Conferencia Diplomática con el fin de examinar una propuesta presentada por Suiza para enmendar el artículo 18 de la Convención, relativo al diseño y la construcción de las centrales nucleares ya existentes y nuevas.

¹²⁰ El Reglamento y Reglamento Financiero [336], las Directrices relativas al Procedimiento de Examen [337] y las Directrices relativas a los Informes Nacionales [338].

6.2.3. Conferencia Diplomática y Declaración de Viena sobre la Seguridad Nuclear

La Conferencia Diplomática, convocada por el Director General, se celebró en la Sede del OIEA el 9 de febrero de 2015 y contó con la asistencia de 71 Partes Contratantes. Las Partes aprobaron por unanimidad la Declaración de Viena sobre la Seguridad Nuclear. Esta Declaración contenía los siguientes principios para el cumplimiento del tercer objetivo de la Convención, que es prevenir los accidentes con consecuencias radiológicas y mitigar tales consecuencias, en caso de que se produzcan:

“1. El diseño, la selección del emplazamiento y la construcción de las centrales nucleares nuevas serán consecuentes con el objetivo de prevenir accidentes durante la puesta en servicio y la explotación y, si se produjese un accidente, de mitigar las emisiones de radionucleidos que puedan causar contaminación a largo plazo fuera del emplazamiento, así como de evitar emisiones radiactivas tempranas o emisiones radiactivas suficientemente grandes como para requerir acciones y medidas protectoras a largo plazo.

2. A lo largo de la vida útil de las instalaciones existentes se llevarán a cabo de forma periódica y ordinaria evaluaciones de la seguridad exhaustivas y sistemáticas a fin de determinar mejoras de la seguridad orientadas al logro del objetivo antes indicado. Las mejoras de la seguridad que sean razonablemente factibles o alcanzables se implementarán de manera oportuna.

3. Los requisitos y disposiciones nacionales para cumplir este objetivo a lo largo de la vida útil de las centrales nucleares tendrán en cuenta las normas de seguridad del OIEA pertinentes y, cuando proceda, las otras buenas prácticas que se determinen, entre otras cosas, en las reuniones de examen de la Convención sobre Seguridad Nuclear.” [341]

La Declaración de Viena tuvo en cuenta el considerable número de esfuerzos e iniciativas emprendidos a nivel internacional, nacional y regional después del accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi para aumentar la seguridad nuclear en todo el mundo.

REFERENCIAS

- [1] NATIONAL POLICE AGENCY, Damage Situation and Police Countermeasures Associated with the 2011 Tohoku District-off the Pacific Ocean Earthquake (2015),
https://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo_e.pdf
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Introductory Statement to Board of Governors (2013),
<https://www.iaea.org/newscenter/statements/introductory-statement-board-governors-3>
- [3] GOVERNMENT OF JAPAN, NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Report of the Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety: The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations (2011),
<http://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima/japan-report>
- [4] GOVERNMENT OF JAPAN, NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Additional Report of the Japanese Government to the IAEA: The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations, Second Report (2011),
http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/iaea/iaea_110911.html
- [5] INVESTIGATION COMMITTEE ON THE ACCIDENT AT THE FUKUSHIMA NUCLEAR POWER STATIONS OF TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Final Report, Cabinet Secretariat of the Government of Japan (2012),
<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/eng/final-report.html>
- [6] INVESTIGATION COMMITTEE ON THE ACCIDENT AT THE FUKUSHIMA NUCLEAR POWER STATIONS OF TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Interim Report, Cabinet Secretariat of the Government of Japan (2011),
<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/eng/interim-report.html>
- [7] NATIONAL DIET OF JAPAN FUKUSHIMA NUCLEAR ACCIDENT INDEPENDENT INVESTIGATION COMMISSION, The Official Report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission, National Diet of Japan, Tokyo (2012).
- [8] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Fukushima Nuclear Accident Analysis Report, TEPCO, Tokyo (2012).
- [9] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Evaluation of the Situation of Cores and Containment Vessels of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units-1 to 3 and Examination into Unsolved Issues in the Accident Progression, TEPCO, Tokyo (2013).
- [10] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Report on the Investigation and Study of Unconfirmed/Unclear Matters in the Fukushima Nuclear Accident, Progress Rep. No. 2, TEPCO, Tokyo (2014).
- [11] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Analysis of the TEPCO Fukushima Daiichi NPS Accident, Interim Rep. (2014),
https://www.iaea.org/sites/default/files/anaylsis_nra1014.pdf
- [12] JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY, Information on the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (2015),
http://www.jma.go.jp/jma/en/2011_Earthquake/Information_on_2011_Earthquake.html
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Power Reactor Information System (PRIS) (2015),
<http://www.iaea.org/pris/>
- [14] JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY, Tsunami Information (Estimated Tsunami Arrival Time and Height) (2011),
http://www.jma.go.jp/en/tsunami/info_04_20110311145026.html
- [15] COASTAL ENGINEERING COMMITTEE OF JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami Information (2013),
<http://www.coastal.jp/tsunami2011/index.php?Field%20survey%20results>
- [16] ORGANISMO DE SEGURIDAD NUCLEAR E INDUSTRIAL, Permiso de establecimiento de la unidad 1 de Fukushima Daiichi, OSNI (1966), (en japonés).
- [17] MINISTERIO DE ECONOMÍA, COMERCIO E INDUSTRIA, Notificación al MECI de los resultados de los ensayos de fugas de cofres de almacenamiento en seco (2013) (en japonés),
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/20130530_03.html

- [18] COMPAÑÍA DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE TOKIO, Manuales de operación de la central nuclear de Fukushima Daiichi de la TEPCO en caso de accidente (2011) (en japonés), http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/earthquake/manual/manual_index.html
- [19] Act on Special Measures Concerning Nuclear Emergency Preparedness, Act No. 156 of 1999, as last amended by Act No. 118 of 2006 (Japan), <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/hourei/data/ASMCNEP.pdf>
- [20] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Building diagrams for 1F ground level and cross section of Unit 4 and the common spent fuel pool, official communication (2014).
- [21] Orden de Aplicación de la Ley de Medidas Especiales relativas a la Preparación para Emergencias Nucleares N° 195 de 5 de abril de 2000 (Japón) (en japonés), <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H12/H12SE195.html>
- [22] COMISIÓN DE SEGURIDAD NUCLEAR, Gestión de accidentes: Medidas contra accidentes severos en reactores nucleares de potencia de agua ligera (1992) (en japonés), http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/nc/t19920528001/t19920528001.html
- [23] NUCLEAR SAFETY COMMISSION, Accident Management for Severe Accidents at Light Water Power Reactor Installations, NSCRG: L-AM-II.01, NSC, Tokyo (1997).
- [24] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Roadmap towards Restoration from the Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (2011), http://www.meti.go.jp/english/speeches/pdf/20110417_a.pdf
- [25] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, IAEA Safety Standards Series No. SSG-18, IAEA, Vienna (2011).
- [26] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Evaluación del emplazamiento de instalaciones nucleares, *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° NS-R-3, OIEA, Viena (2010).
- [27] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Seguridad de las centrales nucleares: Diseño, *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° NS-R-1, OIEA, Viena (2004). (Esta publicación quedó sustituida por la publicación SSR-2/1 (2012)).
- [28] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Terremotos y cuestiones conexas en relación con el emplazamiento de centrales nucleares, *Colección Seguridad del OIEA* N° 50-SG-S1, OIEA, Viena (1994). (Esta publicación quedó sustituida por la publicación SSG-9 (2010)).
- [29] Nuclear Reactor Establishment Change Permit Application, Nuclear Industry Report to the Government No. 5–11 (1993).
- [30] SAKAI, T., TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, “Past tsunami assessments and tsunami on 11 March 2011”, paper presented at 5th Meeting of Working Group 2, Vienna, 2014.
- [31] SOCIEDAD JAPONESA DE INGENIEROS CIVILES, Método de evaluación de tsunamis para centrales nucleares del Japón (2002) (en japonés), <http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/node/5>
- [32] NUCLEAR SAFETY COMMISSION, Regulatory Guide for Reviewing Seismic Design of Nuclear Power Reactor Facilities, NSC, Tokyo (2006).
- [33] SEDE DE FOMENTO DE LAS INVESTIGACIONES SOBRE TERREMOTOS, Sobre la evaluación a largo plazo de la actividad sísmica en la costa oriental del Japón entre la costa de Sanriku y la península de Boso (2002) (en japonés), http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/sanriku_boso.pdf
- [34] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA International Fact Finding Expert Mission of the Fukushima Dai-ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami (2011), http://www-pub.iaea.org/MTCD/meetings/PDFplus/2011/cn200/documentation/cn200_Final-Fukushima-Mission_Report.pdf
- [35] GOVERNMENT OF INDIA, Actions Taken for Indian NPPs Subsequent to Fukushima Nuclear Accident. National Report to the Convention on Nuclear Safety (2012), <http://www.aerb.gov.in/AERBPortal/pages/English/t/documents/CNS2012.pdf>
- [36] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Extreme External Events in the Design and Assessment of Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-1341, IAEA, Vienna (2003).
- [37] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Reporting System for Operating Experience (2014) (unpublished).

- [38] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Follow-up IAEA Mission in Relation to the Findings and Lessons Learned from the 16 July 2007 Earthquake at Kashiwazaki-Kariwa NPP, IAEA, Vienna (2009).
- [39] GRUPO INTERNACIONAL ASESOR EN SEGURIDAD NUCLEAR, La defensa en profundidad en seguridad nuclear, INSAG-10, OIEA, Viena (1997).
- [40] INTERNATIONAL NUCLEAR SAFETY ADVISORY GROUP, Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants: 75-INSAG-3 Rev. 1, INSAG-12, IAEA, Vienna (1999).
- [41] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Severe Accident Management Programmes for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-2.15, IAEA, Vienna (2009).
- [42] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Reactor and Spent Fuel Safety in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA, Vienna (2012).
- [43] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Topical Issues in Nuclear Installation Safety: Defence in Depth — Advances and Challenges for Nuclear Installation Safety, IAEA-TECDOC-CD-1749, IAEA, Vienna (2014).
- [44] SANDIA NATIONAL LABORATORIES, Fukushima Daiichi Accident Study (Status as of April 2012) SAND2012-6173, SNL, Albuquerque, NM (2012).
- [45] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Fukushima Technical Evaluation, Phase 1 — MAA5 Analysis, EPRI, Palo Alto (2013).
- [46] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Report on the Investigation and Study of Unconfirmed/Unclear Matters in the Fukushima Nuclear Accident. Progress Rep. No. 2 (2014), http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu14_e/images/140806e0101.pdf
- [47] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-3, IAEA, Vienna (2010).
- [48] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Glosario de Seguridad Tecnológica del OIEA: Terminología empleada en seguridad tecnológica nuclear y protección radiológica — Edición de 2007, OIEA, Viena (2008).
- [49] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-4, IAEA, Vienna (2010).
- [50] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Seguridad de las centrales nucleares: Explotación, *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° NS-R-2, OIEA, Viena (2004). (Esta publicación quedó sustituida por la publicación SSR-2/2 (2012)).
- [51] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Integrated Regulatory Review Service (IRRS) to Japan, IAEA-NSNI-IRRS-2007/01, IAEA, Vienna (2007).
- [52] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Periodic Safety Review of Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-2.10, IAEA, Vienna (2003). (Esta publicación quedó sustituida por la publicación SSG-25 (2013)).
- [53] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Lessons Learned from the JCO Nuclear Criticality Accident in Japan in 1999 (2009), <http://www-ns.iaea.org/downloads/iec/tokaimura-report.pdf>
- [54] SHIROYAMA, H., “Regulatory failures of nuclear safety in Japan — the case of Fukushima accident”, paper presented at Earth System Governance Tokyo Conf.: Complex Architectures, Multiple Agents, Tokyo (2013), http://tokyo2013.earthsystemgovernance.org/wp-content/uploads/2013/01/0202-SHIROYAMA_Hideaki.pdf
- [55] GOVERNMENT OF JAPAN, Convention on Nuclear Safety National Report of Japan for the Fifth Review Meeting (2010), <http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/NSCenglish/documents/conventions/2011.pdf>
- [56] KATO, S., “Recent development in safety regulation of nuclear fuel cycle activities”, Proc. Int. Conf. on Topical Issues in Nuclear Safety, Vienna, 2001, IAEA, Vienna (2002).
- [57] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Marco gubernamental, jurídico y regulador para la seguridad, *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° GSR Part 1, OIEA, Viena (2010).

- [58] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Periodic Safety Review of Nuclear Power Plants: Experience of Member States, IAEA-TECDOC-1643, IAEA, Vienna (2010).
- [59] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, FY2012 Annual Report, NRA, Tokyo (2012).
- [60] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Enforcement of the New Regulatory Requirements for Commercial Nuclear Power Reactors (2013), <http://www.nsr.go.jp/data/000067212.pdf>
- [61] GRUPO INTERNACIONAL ASESOR EN SEGURIDAD NUCLEAR, Cultura de la seguridad, *Colección Seguridad* N° 75-INSAG-4, OIEA, Viena (1991).
- [62] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Management System for Nuclear Installations, IAEA Safety Standards Series No. GS-G-3.5, IAEA, Vienna (2009).
- [63] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Developing Safety Culture in Nuclear Activities: Practical Suggestions to Assist Progress, Safety Reports Series No. 11, IAEA, Vienna (1998).
- [64] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Culture in Nuclear Installations, IAEA-TECDOC-1329, IAEA, Vienna (2002).
- [65] INSTITUTE OF NUCLEAR POWER OPERATIONS, Lessons Learned from the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, INPO 11-005 Addendum, INPO, Atlanta (2012).
- [66] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, A Comparison of US and Japanese Regulatory Requirements in Effect at the Time of the Fukushima Accident, NRC, Washington, DC (2013).
- [67] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Human and Organizational Factors in Nuclear Safety in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA, Vienna (2014).
- [68] ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, OFICINA INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, OFICINA DE COORDINACIÓN DE ASUNTOS HUMANITARIOS DE LAS NACIONES UNIDAS, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, Disposiciones de preparación para emergencias nucleares o radiológicas, *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° GS-G-2.1, OIEA, Viena (2010).
- [69] ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, OFICINA DE COORDINACIÓN DE ASUNTOS HUMANITARIOS DE LAS NACIONES UNIDAS, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, Preparación y respuesta a situaciones de emergencia nuclear o radiológica, *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° GS-R-2, OIEA, Viena (2004).
- [70] Disaster Countermeasures Basic Act, Act No. 223 of 15 November 1961, as last amended in 1997 (Japan), <http://www.adrc.asia/documents/law/DisasterCountermeasuresBasicAct.pdf>
- [71] Orden de Aplicación de la Ley de Medidas Especiales relativas a la Preparación para Emergencias Nucleares N° 2 de 5 de abril de 2000 (Japón) (en japonés), <http://law.e-gov.go.jp/haishi/H12F03103016002.html>
- [72] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Comment received on Section 3.1 on Technical Volume 3, official communication (23 July 2014).
- [73] GOBIERNO DEL JAPÓN, Manual de respuesta a emergencias nucleares, Gobierno del Japón (2010) (en japonés).
- [74] PREFECTURA DE FUKUSHIMA, Plan de Gestión de Desastres de la Prefectura de Fukushima (2009) (en japonés).
- [75] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Nuclear Operator Emergency Action Plan for the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, TEPCO, Tokyo (2010).
- [76] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Specific Event Report, Fax No. 0042 (11 March 2011).
- [77] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Report from Nuclear Power Plant Management of TEPCO to Minister of Economy, Trade and Industry, Fax No. 1560 (11 March 2011).
- [78] GOVERNMENT OF JAPAN, CENTRAL DISASTER MANAGEMENT COUNCIL, The Basic Disaster Management Plan, Government of Japan, Tokyo (2008).
- [79] GOVERNMENT OF JAPAN, Official web site of the Prime Minister of Japan and His Cabinet (2015), <http://japan.kantei.go.jp/index.html>

- [80] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, About NISA (2015),
<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/english/aboutnisa/contact.html>
- [81] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, TEPCO at a Glance (2015),
<http://www.tepco.co.jp/en/corpinfo/overview/p-glance-e.html>
- [82] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, About the Nuclear Safety Commission (2015),
<http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/NSCenglish/aboutus/overview/overview.htm>
- [83] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, About JNES (2015),
<http://www.nsr.go.jp/archive/jnes/english/index.html>
- [84] MINISTRY OF EDUCATION, CULTURE, SPORTS, SCIENCE AND TECHNOLOGY, Home page of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (2015),
<http://www.mext.go.jp/english/>
- [85] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Home page of the Ministry of Health, Labour and Welfare (2015),
<http://www.mhlw.go.jp/english/>
- [86] MINISTRY OF AGRICULTURE, FORESTRY AND FISHERIES, Home page of the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (2015),
<http://www.maff.go.jp/e/>
- [87] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Home page of the Ministry of Environment (2015),
<http://www.env.go.jp/en/>
- [88] MINISTRY OF DEFENSE, Home page of the Ministry of Defense of Japan (2015),
<http://www.mod.go.jp/e/index.html>
- [89] JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY, Home page of the Japan Meteorological Agency (2015),
<http://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>
- [90] JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY, Home page of the Japan Atomic Energy Agency (2015),
<http://www.jaea.go.jp/english/index.html>
- [91] NATIONAL INSTITUTE OF RADIOLOGICAL SCIENCES, Home page of National Institute of Radiological Sciences (2015),
<http://www.nirs.go.jp/ENG/index.shtml>
- [92] JAPAN NUCLEAR ENERGY SAFETY ORGANIZATION, Initial Operations in the Local Nuclear Emergency Response Headquarters (2013),
<https://www.nsr.go.jp/archive/jnes/content/000124530.pdf>
- [93] NUCLEAR SAFETY COMMISSION, Regulatory Guide: Emergency Preparedness for Nuclear Facilities, NSC, Tokyo (1980).
- [94] Ordenanza sobre la prevención de los peligros de la radiación ionizante, Ordenanza del Ministerio de Trabajo N° 41 de 30 de septiembre de 1972, en su versión enmendada más recientemente por la Ordenanza N° 172 de 16 de julio de 2001 (Japón) (en japonés),
<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S47/S47F04101000041.html>
- [95] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Enforcement of the Ministerial Ordinance on Exemption of the Ordinance on Prevention of Ionizing Radiation Hazards in Response to the Situation Resulting from the Tohoku–Pacific Ocean Earthquake in 2011 (2011),
http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepco/rp/ri_0315_07.html
- [96] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Consultation with and Recommendation from the Labor Policy Council on “the Outline of the Draft Ministerial Ordinance for Abolishment of Exemption in the Ordinance on Prevention of Ionizing Radiation Hazards in Response to the Situation Resulting from the Tohoku–Pacific Ocean Earthquake in 2011” (2011),
http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepco/rp/pr_111121.html
- [97] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Response and Action Taken by the MHLW of Japan on Radiation Protection for Workers Involved in the TEPCO Fukushima Daiichi NPP Accident, MHLW, Tokyo (2013).
- [98] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Progress of the “Roadmap for Immediate Actions for the Assistance of Residents Affected by the Nuclear Incident” (2011).
http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110719_assistance_03.pdf
- [99] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Progress of the “Roadmap for Immediate Actions for the Assistance of Residents Affected by the Nuclear Incident” (2011).
http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110617roadmap_assistance_report.pdf

- [100] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Status of Improvement on Working Environment of workers in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (Attachment 2: About Cool Vest) (2011), <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11061013-e.html>
- [101] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Progress Status of Cooling (Reactors) (2011), http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu11_e/images/110517e5.pdf
- [102] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Occupational Safety and Health Department Notification (2011), http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/dr/dr/ri_0909_01.html
- [103] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Guidelines on Prevention of Radiation Hazards for Workers Engaged in Decontamination Works (2011), http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/dr/dr/pr_120615_a03.pdf
- [104] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, WG3 question 4, 1st submission, official communication (2013).
- [105] GOVERNMENT OF JAPAN, WG3 question 5, 6th submission, official communication (2014).
- [106] WATANABE, Y., “Relief activities conducted by the Japanese Red Cross Society after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident and the challenges for the future”, IAEA Report on Severe Accident Management in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA, Vienna (2015).
- [107] TOMINAGA, T., HACHIYA, M., AKASHI, M., Lessons learned from response to the accident at the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: from the viewpoint of radiation emergency medicine and combined disaster, *Radiat. Emergency Med.* **1** 1–2 (2012) 56–61.
- [108] TANIGAWA, K., HASEGAWA, A., “Medical perspective”, *Radiation Disaster Medicine* (TANIGAWA, K., CHHEM, R. K., Eds), Springer, Heidelberg (2014).
- [109] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, WG3 question 7, 1st submission, official communication (2013).
- [110] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Handling of Food Contaminated by Radioactivity (2011), <http://www.mhlw.go.jp/english/topics/foodsafety/dl/food-110317.pdf>
- [111] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Issuance of Instruction to Restrict Distribution of Foods Concerned, in Relation to the Accident at Fukushima Nuclear Power Plant (2011), <http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/food-110321.pdf>
- [112] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Restriction of Distribution and/or Consumption of Foods Concerned in Fukushima and Ibaraki Prefectures (2011), <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r98520000015wun-att/2r98520000015xym.pdf>
- [113] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Monitoring of Radioactive Contaminants for Agricultural and Livestock Products (2011), <http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/food-110323.pdf>
- [114] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Handling of Provisional Regulation Values for Radioactive Iodine in Fishery Products (2011), <http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/food-110405.pdf>
- [115] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, New Standard Limits for Radionuclides in Foods (2012), http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/new_standard.pdf
- [116] NATIONAL INSTITUTE OF RADIOLOGICAL SCIENCES, Telephone Consultations on Radiation Exposure: Report on Tabulated Results from the Year Following the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Disaster (2014), http://www.nirs.go.jp/publication/irregular/pdf/nirs_m_265en.pdf
- [117] MINISTERIO DE ECONOMÍA, COMERCIO E INDUSTRIA, Cuestiones relativas a actividades de comunicación con el público y esfuerzos futuros relacionados con el accidente de la central nuclear de Fukushima Daiichi de la TEPCO, OSNI, Tokio (2012) (en japonés).
- [118] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Progress of the “Roadmap for Immediate Actions for the Assistance of Residents Affected by the Nuclear Incident” (2011), http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110817_assistance_02.pdf
- [119] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Progress of the “Roadmap for Immediate Actions for the Assistance of Residents Affected by the Nuclear Incident” (2011), http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110920_assistance_02.pdf

- [120] ORGANIZACIÓN DE COMERCIO EXTERIOR DEL JAPÓN, La influencia del gran terremoto del Japón oriental en el comercio internacional (2014) (en japonés), www.jetro.go.jp/world/shinsai/20110318_11.html
- [121] GOVERNMENT OF JAPAN, National Report of Japan to the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management (2011), http://www.nsr.go.jp/english/cooperation/conventions/data/jc_4th.pdf
- [122] NUCLEAR SAFETY COMMISSION, Near-term Policy to Ensure the Safety in Treating and Disposing Contaminated Waste around the Site of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants, NSC, Tokyo (2011).
- [123] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Basic Policy for Emergency Response on Decontamination Work (2011), http://www.kantei.go.jp/jp/singi/genshiryoku/dai19/19_03_gensai.pdf
- [124] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Act on Special Measures Concerning the Handling of Environmental Pollution by Radioactive Materials Discharged by the Nuclear Power Station Accident Associated with the Tohoku District — Off the Pacific Ocean Earthquake that Occurred on March 11, 2011, Act No. 110 as of 2011 (Japan).
- [125] ATOMIC ENERGY SOCIETY OF JAPAN, Final Report of the AESJ Investigation Committee (Announcement) (2014), <http://www.aesj.or.jp/en/announcement/finalreport20141119.pdf>
- [126] INDEPENDENT INVESTIGATION COMMISSION ON THE FUKUSHIMA NUCLEAR ACCIDENT, The Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Disaster: Investigating the Myth and Reality, Routledge, London and New York (2014).
- [127] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Application of the Commission's Recommendations for the Protection of People in Emergency Exposure Situations, Publication 109, Pergamon Press, Oxford and New York (2009).
- [128] NUCLEAR SAFETY COMMISSION, Basic Policy of the Nuclear Safety Commission of Japan on Radiation Protection for Termination of Evacuation and Reconstruction (2011), http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/NSCenglish/geje/20110719suggest_4.pdf
- [129] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica, Publicación 103, SEPR con la autorización de la ICRP, Senda Editorial S.A., Madrid (2008).
- [130] MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY, Roadmap for Immediate Actions for the Assistance of Nuclear Sufferers (2011), http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110517roadmap_assistance.pdf
- [131] MINISTRY OF EDUCATION, CULTURE, SPORTS, SCIENCE AND TECHNOLOGY, Plan to Conduct Detailed Monitoring in Restricted Area and Planned Evacuation Zone (2011), http://www.mext.go.jp/component/english/_icsFiles/afieldfile/2011/06/29/1304084_0613.pdf
- [132] MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY, Lifting the Evacuation-Prepared Area in Case of Emergency Designation (2011), <http://www.reconstruction.go.jp/topics/41gennshiryoku.pdf>
- [133] COMISIÓN DE PREPARACIÓN PARA EMERGENCIAS NUCLEARES, Manual de respuesta a emergencias nucleares (2012) (en japonés), http://www.kantei.go.jp/jp/singi/genshiryoku_bousai/pdf/taisaku_manual.pdf
- [134] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, National Report to the 6th Review Meeting of the Convention on Nuclear Safety (2013), http://www.nsr.go.jp/english/cooperation/conventions/data/cns_6th.pdf
- [135] COMISIÓN DE SEGURIDAD NUCLEAR, Informe provisional sobre el examen de la “Guía de reglamentación: Preparación para emergencias para instalaciones nucleares” (2012) (en japonés), http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/NSCenglish/geje/20120322review_3.pdf
- [136] AUTORIDAD DE REGLAMENTACIÓN NUCLEAR, Directrices de respuesta a una emergencia nuclear (2012) (en japonés), http://www.nsr.go.jp/activity/bousai/data/130905_saitaishishin.pdf

- [137] ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación, *Colección Seguridad del OIEA* N° 115, OIEA, Viena (1997). (Esta publicación quedó sustituida por la publicación GSR Part 3 (en imprenta)).
- [138] Convención sobre la Pronta Notificación de Accidentes Nucleares, INFCIRC/335, OIEA, Viena (1986).
- [139] Convención sobre Asistencia en Caso de Accidente Nuclear o Emergencia Radiológica, INFCIRC/336, OIEA, Viena (1986).
- [140] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Joint Radiation Emergency Management Plan of the International Organizations, EPR-JPLAN, IAEA, Vienna (2010).
- [141] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Emergency Notification and Assistance Technical Operations Manual, EPR-ENATOM (2007), IAEA, Vienna (2007).
- [142] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Response and Assistance Network (2010), <http://www-ns.iaea.org/downloads/iec/info-brochures/13-27031-ranet.pdf>
- [143] Actividades del OIEA en respuesta al accidente de Fukushima, GOV/INF/2011/8, OIEA, Viena (2011).
- [144] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Plan de Acción del OIEA sobre Seguridad Nuclear (2011), <http://www.iaea.org/sites/default/files/actionplanns.pdf>
- [145] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, Patterns in Governmental Decisions and Recommendations (GDR) Information Exchange during the Fukushima NPP Accident, NEA/CRPPH(2012)3, OECD, Paris (2012).
- [146] WORLD HEALTH ORGANIZATION, Preliminary Dose Estimation from the Nuclear Accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, WHO, Geneva (2012).
- [147] WORLD HEALTH ORGANIZATION, Health Risk Assessment from the Nuclear Accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, Based on a Preliminary Dose Estimation, WHO, Geneva (2013).
- [148] UNITED NATIONS, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), UNSCEAR 2013 Report, Vol. I, Scientific Annex A: Levels and Effects of Radiation Exposure Due to the Nuclear Accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2014).
- [149] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Report of ICRP Task Group 84 on Initial Lessons Learned from the Nuclear Power Plant Accident in Japan vis-à-vis the ICRP System of Radiological Protection, ICRP, Ottawa (2012).
- [150] GONZÁLEZ, A.J., AKASHI, M., BOICE, J.D., Jr., CHINO, M., HOMMA, T., ISHIGURE, N., KAI, M., KUSUMI, S., LEE, J.-K., MENZEL, H.-G., NIWA, O., SAKAI, K., WEISS, W., YAMASHITA, S., YONEKURA, Y., Radiological protection issues arising during and after the Fukushima nuclear reactor accident, *J. Radiol. Prot.* **33** 3 (2013) 497–571.
- [151] UNITED NATIONS, FAO/IAEA Food Database, UNSCEAR 2013 Report, Attachment C-8 of Annex A: Levels and Effects of Radiation Exposure Due to the Nuclear Accident After the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2014).
- [152] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, Evaluation of Meteorological Analyses for the Radionuclide Dispersion and Deposition from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, WMO, Geneva (2013).
- [153] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, OECD, Paris (2013).
- [154] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, Guías para la calidad del agua potable, 3ª ed., OMS, Ginebra (2008).
- [155] General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed of 1995, as last amended 2013, Codex Alimentarius Commission, http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/agns/pdf/CXS_193e.pdf

- [156] JAPAN HEALTH PHYSICS SOCIETY, Issues Associated with Radiation Protection after Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster: Responses of and Recommendations from Japan Health Physics Society, JHPS (2012).
- [157] YASUMURA, S., “Overview of Fukushima Health Management Survey”, paper presented at 3rd Int. Expert Symp. on Beyond Radiation and Health Risk: Toward Resilience and Recovery, Fukushima (2014),
[http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/5_S2_Yasumura_FINAL\(0909\).pdf](http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/5_S2_Yasumura_FINAL(0909).pdf)
- [158] PREFECTURA DE FUKUSHIMA, Orden del día, 3ª reunión del Comité de Supervisión para el Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima (2011) (en japonés),
<http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/6497.pdf>
- [159] SASAKAWA, Y., International Expert Symposium in Fukushima, September 2011, *J. Radiol. Prot.* **32** 1 (2012) E7–E8.
- [160] Conclusions and recommendations of the International Expert Symposium in Fukushima: Radiation and Health Risks, *J. Radiol. Prot.* **31** 4 (2011) 381–384.
- [161] PREFECTURA DE FUKUSHIMA, Mandato del Comité para el Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima (2011) (en japonés),
<http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/65128.pdf>
- [162] FUKUSHIMA MEDICAL UNIVERSITY, Basic Survey (Radiation Dose Estimates), 19th Prefectural Oversight Committee Meeting for Fukushima Health Management Survey, Fukushima, Japan, (2015),
http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/media/19-1_Basic_Survey.pdf
- [163] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS, Radiation Quantities and Units, ICRU Rep. 33, Bethesda, MD (1980).
- [164] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, Convenio relativo a la protección de los trabajadores contra las radiaciones ionizantes, N° 115, OIT, Ginebra (1960).
- [165] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), UNSCEAR 2008 Report, Vol. I, Annexes A and B, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2010).
- [166] NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION MEASUREMENTS, Uncertainties in Fatal Cancer Risk Estimates Used in Radiation Protection, NCRP Rep. No. 126, NCRP, Bethesda, MA (1997).
- [167] NACIONES UNIDAS, Informe del Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas, A/67/46, Naciones Unidas, Nueva York (2012).
- [168] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), UNSCEAR 1977 Report, Vol. I, Annexes A and B, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (1977).
- [169] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The International Chernobyl Project: Technical Report, IAEA, Vienna (1991).
- [170] ESLINGER, P.W., et al., Source term estimation of radioxenon released from the Fukushima Dai-ichi nuclear reactors using measured air concentrations and atmospheric transport modeling, *J. Environ. Radioact.* **127** (2014) 127–132.
- [171] STOHL, A., et al., Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: Determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition, *Atmos. Chem. Phys.* **12** 5 (2012) 2313–2343.
- [172] BOWYER, T. W., et al., Elevated radioxenon detected remotely following the Fukushima Nuclear accident, *J. Environ. Radioact.* **102** 7 (2011) 681–687.
- [173] SCHÖPPNER, M., et al., Estimation of the time-dependent radioactive source-term from the Fukushima nuclear power plant accident using atmospheric transport modelling, *J. Environ. Radioact.* **114** (2012) 10–14.
- [174] TERADA, H., KATATA, G., CHINO, M., NAGAI, H., Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. Part II: Verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion, *J. Environ. Radioact.* **112** (2012) 141–154.
- [175] SCIENCE COUNCIL OF JAPAN, A Review of the Model Comparison of Transportation and Deposition of Radioactive Materials Released to the Environment as a Result of the Tokyo Electric Power Company’s Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident (2014),
http://www.jpgu.org/scj/report/20140902scj_report_e.pdf

- [176] CHINO, M., et al., Preliminary estimation of release amounts of ^{131}I and ^{137}Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere, *J. Nucl. Sci. Technol.* **48** 7 (2011) 1129–1134.
- [177] BUESSELER, K., AOYAMA, M., FUKASAWA, M., Impacts of the Fukushima nuclear power plants on marine radioactivity, *Environ. Sci. Technol.* **45** 23 (2011) 9931–9935.
- [178] EUROPEAN COMMISSION, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, WORLD HEALTH ORGANIZATION, One Decade after Chernobyl: Summing up the Consequences of the Accident, IAEA, Vienna (1996).
- [179] Chernobyl: Looking Back to Go Forward (Proc. Int. Conf Vienna, 2005), IAEA, Vienna (2005).
- [180] INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE, Accident de la Centrale de Fukushima Daiichi: Modélisation de la Dispersion des Rejets Radioactifs dans l'Atmosphère à l'Échelle Mondiale (2011),
http://www.irsn.fr/FR/popup/Pages/irsn-meteo-france_30mars.aspx
- [181] Exploring the Impacts of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant on the Ocean (Proc. Fukushima Ocean Impacts Symp. Tokyo, 2012), Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA (2012).
- [182] MADIGAN, D.J., BAUMANN, Z., FISHER, N.S., Pacific bluefin tuna transport Fukushima-derived radionuclides from Japan to California, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **109** 24 (2012) 9483–9486.
- [183] MASUMOTO, Y., “Ocean models: How far/fast does Fukushima contamination travel?”, Exploring the Impacts of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants on the Ocean (Proc. Fukushima Ocean Impacts Symp. Tokyo, 2012), Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA (2012).
- [184] MASUMOTO, Y., et al., Oceanic dispersion simulations of ^{137}Cs released from the Fukushima Daiichi nuclear power plant, *Elements* **8** 3 (2012) 207–212.
- [185] HONDA, M.C., AONO, T., AOYAMA, M., Dispersion of artificial caesium-134 and -137 in the Western North Pacific one month after the Fukushima accident, *Geochem. J.* **46** 6 (2012) e1–9.
- [186] RYPINA, I.I., et al., Short-term dispersal of Fukushima-derived radionuclides off Japan: modeling efforts and model-data intercomparison, *Biogeosciences* **10** 1 (2013) 4973–4990.
- [187] AOYAMA, M., HIROSE, K., IGARASHI, Y., Re-construction and updating our understanding on the global weapons tests ^{137}Cs fallout, *J. Environ. Monitor.* **8** 4 (2006) 431–438.
- [188] BUESSELER, K., AOYAMA, M., “Fukushima results”, Exploring the impacts of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants on the Ocean (Proc. Fukushima Ocean Impacts Symp. Tokyo, 2012), Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA (2012).
- [189] AUTORIDAD DE REGLAMENTACIÓN NUCLEAR, Información sobre monitorización radiológica. Información sobre la monitorización de los niveles de radiactividad ambiental, NRA (2015) (en japonés),
<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/191/list-1.html>
- [190] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), UNSCEAR 2000 Report, Vol. I, Annexes A and B, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2000).
- [191] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Reading of Radioactivity Level in Fallout by Prefecture (2011-2015),
<http://radioactivity.nsr.go.jp/en/list/194/list-1.html>
- [192] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Airborne Monitoring,
<http://radioactivity.nsr.go.jp/en/list/278/list-1.html>
- [193] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Notice No. 0315 Article 1 of the Department of Food Safety (2012),
http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/food-120821_1.pdf
- [194] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Mission Report: Project NSRW 9/13 Assistance in the Use of Radiation Monitoring Data to Develop Maps to be Made Available to the Public, Fukushima Prefecture, 16–19 December 2013 (unpublished).
- [195] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, The Survey Results of Radioactive Materials in Tap Water, MHLW, Tokyo (2011).
- [196] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, Recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica 1990, Publicación 60, SEPR con la autorización de la ICRP, EDICOMPLET S.A., Madrid (1995).

- [197] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Application of the Commission's Recommendations to the Protection of People Living in Long-term Contaminated Areas After a Nuclear Accident or a Radiation Emergency, Publication 111, Elsevier, Oxford (2009).
- [198] COMISIÓN EUROPEA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad, *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° GSR Part 3, OIEA, Viena (en imprenta).
- [199] AKASHI, M., TOMINAGA, T., HACHIYA, M., TATSUZAKI, H., “Medical management of the consequences of the Fukushima nuclear plant incident”, Medical Basis for Radiation Accident Preparedness (Proc. 5th Int. REAC/TS Symp. Oak Ridge, 2013), Oak Ridge, TN (2013).
- [200] YASUMURA, S., GOTO, A., YAMAZAKI, S., REICH, M.R., Excess mortality among relocated institutionalized elderly after the Fukushima nuclear disaster, *Public Health* **127** 2 (2013) 186–188.
- [201] NOMURA, S., et al., Mortality risk amongst nursing home residents evacuated after the Fukushima Nuclear accident: A retrospective cohort study, *PLoS ONE* **8** 3 (2013) e60192.
- [202] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Principles for Intervention for Protection of the Public in a Radiological Emergency, Publication 63, Pergamon Press, Oxford and New York (1993).
- [203] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Publication and Enforcement of “the Ministerial Ordinance for Abolishment of Exemption in the Ordinance on Prevention of Ionizing Radiation Hazards in Response to the Situation Resulting from the Tohoku–Pacific Ocean Earthquake in 2011” (2011), http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepcorp/pr_111216.html
- [204] AKAHANE, K., et al., NIRS external dose estimation system for Fukushima residents after the Fukushima Dai-ichi NPP accident, *Sci. Rep.* **3** (2013) 1670.
- [205] ISHIKAWA, T., “The basic survey: Estimation of external doses to residents in Fukushima Prefecture”, paper presented at 3rd Int. Expert Symp. on Beyond Radiation and Health Risk: Toward Resilience and Recovery, Fukushima, 2014, http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/6_S2_Ishikawa.pdf
- [206] NAGATAKI, S., TAKAMURA, N., KAMIYA, K., AKASHI, M., Measurements of individual radiation doses in residents living around the Fukushima nuclear power plant, *Radiat. Res.* **180** 5 (2013) 439–447.
- [207] FUKUSHIMA MEDICAL UNIVERSITY, “Response rates to the basic survey by district. Data as of 31 December 2014” (Proc. 18th Prefectural Oversight Committee Meeting for Fukushima Health Management Survey Fukushima, 2015), https://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/media/18-1_Basic_Survey_Appendix.pdf
- [208] FUKUSHIMA MEDICAL UNIVERSITY, “Basic survey (radiation dose estimates)” (Proc. 18th Prefectural Oversight Committee Meeting for Fukushima Health Management Survey Fukushima, 2015) (2015), http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/media/18-1_Basic_Survey.pdf
- [209] CIUDAD DE DATE, Boletín sobre recuperación y reactivación en la ciudad de Date n° 8: Análisis sobre la medición de la dosis anual debida a la exposición externa (2013) (en japonés), <http://www.city.date.fukushima.jp/uploaded/attachment/10035.pdf>
- [210] TSUBOKURA, M., et al., Absence of internal radiation contamination by radioactive cesium among children affected by the Fukushima Daiichi nuclear power plant disaster, *Health Phys* **108** 1 (2015) 39–43.
- [211] HAYANO, R.S., et al., Whole-body counter survey results 4 months after the Fukushima Dai-ichi NPP accident in Minamisoma City, Fukushima, *J. Radiol. Prot.* **34** 4 (2014) 787.
- [212] HAYANO, R. S., et al., Internal radiocesium contamination of adults and children in Fukushima 7 to 20 months after the Fukushima NPP accident as measured by extensive whole-body-counter surveys, *Proc. Jpn Acad. Ser. B Phys. Biol. Sci.* **89** 4 (2013) 157–163.
- [213] MATSUDA, N., et al., Assessment of internal exposure doses in Fukushima by a whole body counter within one month after the nuclear power plant accident, *J. Radiat. Res.* **179** 6 (2013) 663–668.
- [214] KIM, E., et al., “Screening survey on thyroid exposure for children after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident”, Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident (Proc. 1st NIRS Symp.) (KURIHARA, O., AKAHANE, K., FUKUDA, S., MIYAHARA, N., YONAI, S., Eds), National Institute of Radiological Sciences, Chiba (2012) 59–66.

- [215] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Updated worker doses, official communication (2015).
- [216] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Evaluation of the Exposure Dose of Workers at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Attachment: Distribution of Thyroid Equivalent Doses (2015), http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2015/1248073_6844.html
- [217] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Re-evaluation Results of Committed Doses for Emergency Workers at the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (2013), http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepco/rp/pr_130705_a02.pdf
- [218] YASUI, S., Governmental re-evaluation of the committed effective dose received by emergency workers at the TEPCO Fukushima Daiichi NPP accident, *J. Occupat. Environ. Hyg.* **12** 5 (2015) D60–D70.
- [219] DEFENSE THREAT REDUCTION AGENCY, Radiation Dose Assessments for Shore-based Individuals in Operation Tomodachi, DTRA-TR-12-001, DTRA, Fort Belvoir, VA (2012).
- [220] HASHIMOTO, S., et al., “First two-year result of the comprehensive health check as one facet of the Fukushima Health Management Survey” paper presented at 3rd Int. Expert Symp. on Beyond Radiation and Health Risk: Toward Resilience and Recovery, Fukushima, 2014, [http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/7_S2_Hashimoto_FINAL\(0909\).pdf](http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/7_S2_Hashimoto_FINAL(0909).pdf)
- [221] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, ICRP Statement on Tissue Reactions/Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs: Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context, Publication 118, Elsevier, Oxford (2012).
- [222] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Result of the Investigation on Exposure to Radiation of Workers from Cooperative Companies at Unit 3 in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (2011), <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11032503-e.html>
- [223] NACIONES UNIDAS, Informe del Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas, A/68/46, Naciones Unidas, Nueva York (2013).
- [224] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Low-dose Extrapolation of Radiation-related Cancer Risk, Publication 99, Elsevier, Oxford (2005).
- [225] NACIONES UNIDAS, Informe del Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas, A/63/46, Naciones Unidas, Nueva York (2008).
- [226] SUZUKI, S., et al., “Three-Year Results and Future Scope of the Fukushima Thyroid Ultrasound Examination after the Fukushima NPP Accident”, paper presented at 3rd Int. Expert Symp. on Beyond Radiation and Health Risk: Toward Resilience and Recovery, Fukushima (2014), [http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/9_S2_Suzuki_FINAL\(0909\).pdf](http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/9_S2_Suzuki_FINAL(0909).pdf)
- [227] HAYASHIDA, N., et al., Thyroid ultrasound findings in a follow-up survey of children from three Japanese Prefectures: Aomori, Yamanashi, and Nagasaki, *Sci. Rep.* **5** (2015).
- [228] FUKUSHIMA PREFECTURE, Proc. 18th Prefectural Oversight Committee Meeting for Fukushima Health Management Survey (2015), http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/20150212_Thyroid_Ultrasound_Examination.html
- [229] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, Embarazo e irradiación médica, Publicación 84, SEPR y SAR, Madrid (2000).
- [230] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Doses to the Embryo and Foetus from Intakes of Radionuclides by the Mother, Publication 88, Pergamon Press, Oxford and New York (2001).
- [231] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Biological Effects after Prenatal Irradiation (Embryo and Foetus), Publication 90, Pergamon Press, Oxford and New York (2003).
- [232] NOMURA, Y., “Pregnancy and birth survey (by the Radiation Medical Science Center for the Fukushima Health Management Survey)”, paper presented at 3rd Int. Expert Symp. on Beyond Radiation and Health Risk: Toward Resilience and Recovery, Fukushima, 2014, [http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/10_S2_Nomura_FINAL\(0909\).pdf](http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/10_S2_Nomura_FINAL(0909).pdf)
- [233] NOMURA, Y., FUJIMORI, K., Survey of pregnant women in Fukushima Prefecture and future issues, *Fukushima J. Med. Sci.* **60** 2 (2014) 213.
- [234] YASUMURA, S., et al., Study protocol for the Fukushima Health Management Survey, *J. Epidemiol.* **22** 5 (2012) 375–383.
- [235] KAWAKAMI, N., Mental Health of Residents Living in Shelters, Japanese Association of Epidemiology, Tokyo (2014).

- [236] YABE, H., et al., Psychological distress after the Great East Japan Earthquake and Fukushima Daiichi nuclear power plant accident: results of a Mental Health and Lifestyle Survey through the Fukushima Health Management Survey in FY2011 and FY2012, *Fukushima J. Med. Sci.* **60** 1 (2014) 57–67.
- [237] KAWAKAMI, N., TSUCHIYA, M., UMEDA, M., KOENEN, K.C., KESSLER, R.C., Trauma and posttraumatic stress disorder in Japan: results from the World Mental Health Japan Survey, *J. Psychiatr. Res.* **53** (2014) 157–165.
- [238] IWADARE, Y., et al., Posttraumatic symptoms in elementary and junior high school children after the 2011 Japan earthquake and tsunami: Symptom severity and recovery vary by age and sex, *J. Pediatrics* **164** 4 (2014) 917–921.
- [239] BROMET, E.J., Emotional consequences of nuclear power plant disasters, *Health Phys.* **106** 2 (2014) 206–210.
- [240] GOTO, A., et al., Maternal confidence of Fukushima mothers before and after the nuclear power plant disaster in Northeast Japan: analyses of municipal health records, *J. Commun. Healthcare* **7** 2 (2014) 106–116.
- [241] BROMET, E. J., et al., Cross-national epidemiology of DSM-IV major depressive episode, *BMC Med.* **9** 1 (2011) 90.
- [242] SHIGEMURA, J., TANIGAWA, T., SAITO, I., NOMURA, S., Psychological distress in workers at the Fukushima nuclear power plants, *JAMA* **308** 7 (2012) 667–669.
- [243] SHIGEMURA, J., et al., Associations between disaster exposures, peritraumatic distress, and posttraumatic stress responses in Fukushima nuclear plant workers following the 2011 nuclear accident: the Fukushima NEWS project study, *PLoS One* **9** 2 (2014) e87516.
- [244] MATSUOKA, Y., et al., Concern over radiation exposure and psychological distress among rescue workers following the Great East Japan Earthquake, *BMC Public Health* **12** (2012) 249.
- [245] BROMET, E.J., Mental health consequences of the Chernobyl disaster, *J Radiol Prot* **32** 1 (2012) N71–75.
- [246] BROMET, E.J., HAVENAAR, J. M., Psychological and perceived health effects of the Chernobyl disaster: A 20-year review, *Health Phys* **93** 5 (2007) 516–521.
- [247] BROMET, E.J., HAVENAAR, J. M., GUEY, L. T., A 25 year retrospective review of the psychological consequences of the Chernobyl accident, *Clin. Oncol.* **23** 4 (2011) 297–305.
- [248] MAEDA, M., et al., “Psychological effects on people in Fukushima: Results of a mental health and lifestyle survey”, paper presented at 3rd Int. Expert Symp. on Beyond Radiation and Health Risk: Toward Resilience and Recovery, Fukushima, 2014,
[http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/8_S2_Maeda_FINAL\(0909\).pdf](http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/8_S2_Maeda_FINAL(0909).pdf)
- [249] KESSLER, R.C., et al., Screening for serious mental illness in the general population, *Arch. Gen. Psychiatr.* **60** 2 (2003) 184–189.
- [250] BLANCHARD, E.B., JONES-ALEXANDER, J., BUCKLEY, T.C., FORNERIS, C.A., Psychometric properties of the PTSD checklist (PCL), *Behav. Res. Ther.* **34** 8 (1996) 669–673.
- [251] EWING, J.A., Detecting alcoholism. The CAGE questionnaire, *JAMA* **252** 14 (1984) 1905–1907.
- [252] GOODMAN, R., Psychometric properties of the strengths and difficulties questionnaire, *J. Am. Acad. Child Adolesc. Psychiatry* **40** 11 (2001) 1337–1345.
- [253] MATSUISHI, T., et al., Scale properties of the Japanese version of the strengths and difficulties questionnaire (SDQ): A study of infant and school children in community samples, *Brain Dev.* **30** 6 (2008) 410–415.
- [254] OGURI, K., et al., Hadal disturbance in the Japan Trench induced by the 2011 Tohoku–Oki earthquake, *Sci. Rep.* **3** (2013).
- [255] CENTRO JAPONÉS SOBRE DIVERSIDAD BIOLÓGICA, Sitio web oficial sobre el efecto del terremoto y el tsunami (en japonés),
<http://www.shiokaze.biodic.go.jp>
- [256] NAKAJIMA, H., KOARAI, M., Assessment of tsunami flood situation from the Great East Japan Earthquake, *Bull. Geosp. Inf. Auth. Jpn.* **59** (2011) 55–66.
- [257] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, A Framework for Assessing the Impact of Ionising Radiation on Non-human Species, Publication 91, Pergamon Press, Oxford and New York (2003).
- [258] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Protection of the Environment Under Different Exposure Situations, Publication 124, Pergamon Press, Oxford and New York (2014).

- [259] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Environmental Protection: Transfer Parameters for Reference Animals and Plants, Publication 114, Elsevier, Oxford (2009).
- [260] LINKOV, I., BURMISTROV, D., Model uncertainty and choices made by modelers: Lessons learned from the International Atomic Energy Agency model intercomparisons, *Risk Anal.* **23** 6 (2003) 1297–1308.
- [261] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), UNSCEAR 2008 Report, Vol. II, Scientific Annexes C, D and E, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2011).
- [262] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), UNSCEAR 1996 Report, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (1996).
- [263] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad - Edición provisional, *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° GSR Part 3 (Interim), OIEA, Viena (2011). (Esta publicación quedó sustituida por la publicación GSR Part 3 (en imprenta).
- [264] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Summary Report of the Preliminary Findings of the IAEA Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-site the Fukushima Dai-ichi NPP (2011),
<https://www.iaea.org/sites/default/files/preliminaryfindings2011.pdf>
- [265] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Follow-up IAEA International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-Site of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (2013),
https://www.iaea.org/sites/default/files/final_report230114.pdf
- [266] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Basic Principles of the Act on Special Measures Concerning the Handling of Environment Pollution by Radioactive Materials Discharged from the Nuclear Power Station Accident Associated with the Tohoku District—Off the Pacific Ocean Earthquake that Occurred on March 11, 2011 (2011),
http://josen.env.go.jp/en/framework/pdf/basic_principles.pdf
- [267] GOLIKOV, V., et al., Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms, *Radiat. Environ. Biophys* **46** 4 (2007) 375–382.
- [268] CABINET OFFICE, “Designating and rearranging the areas of evacuation”, paper presented at Follow-up IAEA International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-Site the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Tokyo and Fukushima Prefecture, 2013.
- [269] FUKUSHIMA PREFECTURE, Steps for Revitalization in Fukushima (2014),
<http://www.pref.fukushima.lg.jp/e.od.hp.transer.com/sec/11015b/fukkoukeikaku1081.html>
- [270] MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY, Areas to which Evacuation Orders have been Issued (2013),
http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/20130807_01.pdf
- [271] JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY, Use of Knowledge and Experience Gained from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident to Establish the Technical Basis for Strategic Off-Site Response (2015),
<http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/search/servlet/search?5049878>
- [272] JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY, Remediation of Contaminated Areas in the Aftermath of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: Overview, Analysis and Lessons Learned, Part 1: A Report on the “Decontamination Pilot Project”, JAEA-Review 2014-051, JAEA, Tokyo (2015).
- [273] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Progress on Off-site Clean-up Efforts in Japan (2015),
http://josen.env.go.jp/en/pdf/progressseet_progress_on_cleanup_efforts.pdf?150113
- [274] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Unit prices for decontamination in the SDAs directly controlled by the national government, official communication (2015).
- [275] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4, TEPCO (2011),
http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/111221_02.pdf
- [276] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Revised Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4 (2013),
http://josen.env.go.jp/en/documents/pdf/workshop_july_17-18_2013_02.pdf

- [277] INTER-MINISTERIAL COUNCIL FOR CONTAMINATED WATER AND DECOMMISSIONING ISSUES, Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (2015).
- [278] Act for Establishment of the Nuclear Regulation Authority, Act No. 47, 27 June, 2012, as amended by Act No. 82 of 2013 (Japan),
<https://www.nsr.go.jp/data/000067231.pdf>
- [279] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Implementation Plan of the Measures to be taken at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Designated as a Specified Reactor Facility (Outline) (2012),
http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/images/handouts_12120701-e.pdf
- [280] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Measures for Mid-Term Risk Reduction at TEPCO's Fukushima Daiichi NPS (2015),
<http://www.nsr.go.jp/data/000098679.pdf>
- [281] CONTAMINATED WATER TREATMENT MEASURES COMMITTEE, Measures for the Prevention of Groundwater Inflow, TEPCO (2012).
- [282] GOVERNMENT OF JAPAN, TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Progress Status and Future Challenges of Mid-to-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of Units 1–4 of TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (2012),
<http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/roadmap/images/m121203-e.pdf>
- [283] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Comments received on Section 5, official communication (2 March 2015).
- [284] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Contaminated Water Treatment (2015),
<http://www.tepco.co.jp/en/decommission/planaction/alps/index-e.html>
- [285] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Fukushima Daiichi NPS Prompt Report 2014: Bypass of Clean Groundwater to Ocean Starts (2014),
http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2014/1236566_5892.html
- [286] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, “Measures to stop or reduce ingress of groundwater into reactor and turbine buildings”, paper presented at IAEA International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap Towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4 (Second Mission), Tokyo and Fukushima Prefecture, 2013.
- [287] MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY, Fact Sheet: Overview of Contaminated Water Issue at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Agency for Natural Resources and Energy (2013),
http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20130822_01.pdf
- [288] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1–4 (Second Mission) (2014),
<http://www.meti.go.jp/press/2013/02/20140213003/20140213003-2.pdf>
- [289] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1–4 (Third Mission) (2015),
<https://www.iaea.org/sites/default/files/missionreport170215.pdf>
- [290] COMPAÑÍA DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE TOKIO, Finalización de la retirada del combustible de la piscina de combustible gastado de la unidad 4 de la central nuclear de Fukushima Daiichi (2014) (en japonés),
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2014/images/handouts_141222_04-j.pdf
- [291] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Mid-and-Long-Term Roadmap Towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1–4 (2013),
http://www.meti.go.jp/english/press/2013/pdf/0627_01.pdf
- [292] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Clausura de instalaciones que utilizan material radiactivo, *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° WS-R-5, OIEA, Viena (2010). (Esta publicación quedó sustituida por la publicación GSR Part 6 (2014)).
- [293] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident, IAEA, Vienna (2013).
- [294] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, Nucl. Law Bull. **90** 2 (2012).

- [295] GOVERNMENT OF JAPAN, Flow chart of specified waste and contaminated soil management in other prefectures, official communication (2015).
- [296] COMPAÑÍA DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE TOKIO, Planes a medio y largo plazo de almacenamiento de desechos sólidos de la central nuclear de Fukushima Daiichi (Borrador) (2014) (en japonés), http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/images/1140407_05-j.pdf
- [297] COMPAÑÍA DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE TOKIO, Creación de instalaciones para cofres de almacenamiento temporal en seco (2014) (en japonés), http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/120625/120625_02cc.pdf
- [298] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, A Mid-and-long-term plan for storage of solid wastes in Fukushima Daiichi NPS, official communication (2014).
- [299] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, “Radioactive Waste Management — Toward the decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1–4”, paper presented at IAEA International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap Towards the Decommissioning of TEPCO’s Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1–4 (Second Mission), Tokyo and Fukushima Prefecture, 2013.
- [300] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Progress Status of Mid-and-Long-Term Roadmap Towards the Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1–4 (2012), <http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/roadmap/images/m120730-e.pdf>
- [301] SECRETARIAT OF THE TEAM FOR COUNTERMEASURES FOR DECOMMISSIONING AND CONTAMINATED WATER TREATMENT, Summary of Decommissioning and Contaminated Water Management (2014), <http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20140529-e.pdf>
- [302] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Reports from ICRP Dialogue Initiatives (2014), <http://www.icrp.org/page.asp?id=189>
- [303] JAPAN EXTERNAL TRADE ORGANIZATION, 2011 JETRO Global Trade and Investment Report: International Business as a Catalyst for Japan’s Reconstruction, JETRO, Tokyo (2011).
- [304] FISHERIES AGENCY, The Leakage of Contaminated Water at TEPCO’s Fukushima Daiichi Nuclear Power Station and the Safety of Fishery Products (2015).
- [305] FOOD STANDARDS AGENCY, Import of Feed and Food Originating in or Consigned from Japan (2012), http://www.food.gov.uk/business-industry/imports/banned_restricted/japan#.UKS7deQ0V8E
- [306] JAPAN EXTERNAL TRADE ORGANIZATION, JETRO Global Trade and Investment Report — Overview (2014), http://www.jetro.go.jp/en/reports/white_paper/trade_invest_2014.pdf
- [307] Act on Compensation for Nuclear Damage, 1961, Act. Nr. 147, as amended by Act Nr. 19 in 2009.
- [308] MINISTERIO DE EDUCACIÓN, CULTURA, DEPORTES, CIENCIA Y TECNOLOGÍA, COMITÉ DE RESOLUCIÓN DE CONTROVERSIAS PARA LA INDEMNIZACIÓN POR DAÑOS NUCLEARES, Directrices provisionales sobre la determinación del alcance de los daños nucleares derivados del accidente en las centrales nucleares de Fukushima Daiichi y Daini de la Compañía de Energía Eléctrica de Tokio (2011) (en japonés), http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/kaihatu/016/houkoku/_icsFiles/afieldfile/2011/08/17/1309452_1_2.pdf
- [309] COMPAÑÍA DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE TOKIO, Indemnización por costos adicionales resultantes del regreso temprano una vez levantada la orden de evacuación (2014) (en japonés), http://www.tepco.co.jp/cc/press/2014/1235026_5851.html
- [310] PERKO, T., VALUCH, J., NAGY, A., LAMMERS, P., MAYS, C., Overview of Mass and New Media Treatment of Ionizing Radiation Topics: The Case of Fukushima, EAGLE Coordination Project (2013), <http://eagle.sckcen.be/en/Deliverables>
- [311] FUKUSHIMA PREFECTURE, Steps for Revitalization in Fukushima, Fukushima Prefecture (2013).
- [312] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, FUKUSHIMA PREFECTURE, Decontamination Information Plaza (2013).
- [313] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, “Stakeholder communication overview for decontamination”, paper presented at Follow-up IAEA International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-site of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Tokyo and Fukushima Prefecture, 2013.

- [314] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Enhancing Transparency and Communication Effectiveness in the Event of a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA, Vienna (2012).
- [315] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Director General Calls for High Level Conference to Strengthen Nuclear Safety (2011),
<https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-director-general-calls-high-level-conference-strengthen-nuclear-safety>
- [316] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Final Report of the International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-site the Fukushima Dai-ichi NPP (2011),
http://www.mofa.go.jp/mofaj/saigai/pdfs/iaea_mission_1110_en.pdf
- [317] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Mission to Review NISA's Approach to the Comprehensive Assessments for the Safety of Existing Power Reactor Facilities Conducted in Japan (2012),
<https://www.iaea.org/sites/default/files/nisamissionreport2012.pdf>
- [318] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Mission to Onagawa Nuclear Power Station to Examine the Performance of Systems, Structures and Components Following the Great East Japanese Earthquake and Tsunami (2012).
- [319] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1–4 (2013),
<http://www.iaea.org/sites/default/files/missionreport220513.pdf>
- [320] Declaración de la Conferencia Ministerial del OIEA sobre Seguridad Nuclear, Viena, 20 de junio de 2011, INF/CIRC/821, OIEA, Viena (2011).
- [321] Medidas para fortalecer la cooperación internacional en materia de seguridad nuclear, radiológica, del transporte y de los desechos, Resolución GOV/2013/32-GC(57)/RES/9, OIEA, Viena (2013).
- [322] Progresos realizados en la aplicación del Plan de Acción del OIEA sobre Seguridad Nuclear, GOV/INF/2012/11-GC(56)/INF/5, OIEA, Viena (2012).
- [323] Progresos realizados en la aplicación del Plan de Acción del OIEA sobre Seguridad Nuclear, GOV/INF/2013/8-GC(57)/INF/5, OIEA, Viena (2013).
- [324] Progresos realizados en la aplicación del Plan de Acción del OIEA sobre Seguridad Nuclear, GOV/INF/2014/15-GC(58)/INF/7, OIEA, Viena (2014).
- [325] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Protection against Extreme Earthquakes and Tsunamis in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA, Vienna (2012).
- [326] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Radiation Protection After the Fukushima Daiichi Accident: Promoting Confidence and Understanding, IAEA, Vienna (2014).
- [327] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA, Vienna (2013).
- [328] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Strengthening Nuclear Regulatory Effectiveness in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA, Vienna (2013).
- [329] Memorandum of Cooperation between Fukushima Prefecture and the International Atomic Energy Agency Following the Accident at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (2012),
http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima_2012/pdfs/fukushima_iaea_en_04.pdf
- [330] Practical Arrangements between Fukushima Prefecture and the International Atomic Energy Agency on Cooperation in the Area of Radiation Monitoring and Remediation (2012),
http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima_2012/pdfs/fukushima_iaea_en_05.pdf
- [331] Practical Arrangements between Fukushima Medical University and the International Atomic Energy Agency on Cooperation in the Area of Human Health (2012),
http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima_2012/pdfs/fukushima_iaea_en_06.pdf
- [332] Practical Arrangements between the Ministry of Foreign Affairs of Japan and the International Atomic Energy Agency on Cooperation in the Area of Emergency Preparedness and Response (2012),
http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima_2012/pdfs/fukushima_iaea_en_07.pdf
- [333] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA and Japan Host Fukushima Ministerial Conference on Nuclear Safety (2012),
<https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-and-japan-host-fukushima-ministerial-conference-nuclear-safety>

- [334] Convención sobre Seguridad Nuclear, INFCIRC/449, OIEA, Viena (1994).
- [335] COMUNIDAD EUROPEA DE LA ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL, AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, Principios fundamentales de seguridad, *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° SF-1, OIEA, Viena (2007).
- [336] Convención sobre Seguridad Nuclear, Reglamento y Reglamento Financiero, INFCIRC/573/Rev.6, OIEA, Viena (2015).
- [337] Directrices relativas al procedimiento de examen prescrito por la Convención sobre Seguridad Nuclear, INFCIRC/571/Rev.7, OIEA, Viena (2015).
- [338] Directrices relativas a los informes nacionales prescritos por la Convención sobre Seguridad Nuclear, INFCIRC/572/Rev.5, OIEA, Viena (2015).
- [339] Informe final resumido de la Segunda Reunión Extraordinaria de las Partes Contratantes en la Convención sobre Seguridad Nuclear, CNS/ExM/2012/04/Rev.2 (2012), <http://www.iaea.org/sites/default/files/cns-summaryreport310812.pdf>
- [340] Informe resumido de la Sexta Reunión de Examen de las Partes Contratantes en la Convención sobre Seguridad Nuclear, CNS/6RM/2014/11_Final (2014), http://www-ns.iaea.org/downloads/ni/safety_convention/2014-cns-summary-report-w-annexes-signed.pdf
- [341] Informe resumido y Declaración de Viena sobre la Seguridad Nuclear, CNS/DC/2015/3/Rev.2 (2015), https://www.iaea.org/sites/default/files/cns_summary090215.pdf

LISTA DE ABREVIATURAS

μGy	microgray
μSv	microsievert
AD	agua dulce
AEN de la OCDE	Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE
ALPS	Sistemas Avanzados de Procesamiento de Líquidos
AM	agua de mar
APS	análisis probabilista de la seguridad
ARN	Autoridad de Reglamentación Nuclear
Bq	becquerel
CA	Condensador de aislamiento
CAA	condensado de agua aparte
CC	corriente continua
CCREN	Consejo Conjunto de Respuesta a la Emergencia Nuclear
CGREN	Cuartel General de Respuesta a la Emergencia Nuclear
CGREN Local	Cuartel General Local de Respuesta a la Emergencia Nuclear
CN	central nuclear
CRIEPI	Instituto Central de Investigación de la Industria Eléctrica
ENATOM	Manual sobre operaciones técnicas para la notificación y asistencia en situaciones de emergencia
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GDE	generador diésel de emergencia
Gy	gray
I+D	investigación y desarrollo
IACRNE	Comité Interinstitucional sobre Emergencias Radiológicas y Nucleares
IC	intervalo de confianza
ICRP	Comisión Internacional de Protección Radiológica
IGP	Instituto de Geodesia y Fotogrametría
IMMSP	Instituto de Problemas Matemáticos de Máquinas y Sistemas
INES	Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos
INSAG	Grupo Internacional de Seguridad Nuclear
IRAP	Inyección de refrigerante a alta presión
IRRS	Servicio Integrado de Examen de la Situación Reglamentaria
IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (Instituto de Radioprotección y Seguridad Nuclear)
JAEA	Organismo de Energía Atómica del Japón
JAMSTEC	Organismo de Ciencias y Tecnologías Marinas y Terrestres del Japón
JCO	Empresa de Conversión de Combustibles Nucleares del Japón
JCOPET	Subsistema anidado regional de resolución de mareas del Experimento sobre Previsibilidad Oceánica en la Costa del Japón
JKEO	Observatorio de la Extensión de Kuroshio de JAMSTEC
JNES	Organización de Seguridad de la Energía Nuclear del Japón
KEO	Observatorio de la Extensión de Kuroshio
KIOST	Instituto Coreano de Ciencia y Tecnología Oceánicas
KNOT	Kyodo North Pacific Ocean Time-series (Serie Temporal Colaborativa del Océano Pacífico Norte)
MECI	Ministerio de Economía, Comercio e Industria
MEXT	Ministerio de Educación, Cultura, Deportes, Ciencia y Tecnología
mGy	miligray
MPa	megapascal
MSSG	Simulador Multiescala del Geoambiente

mSv	milisievert
NBS	Normas Básicas de Seguridad
NIES	Instituto Nacional de Estudios Ambientales
NIRS	Instituto Nacional de Ciencias Radiológicas
OIT	Organización Internacional del Trabajo
OMM	Organización Meteorológica Mundial
OMS	Organización Mundial de la Salud
OP	Onahama Peil
ORNE	Organismo de Recursos Naturales y Energía
OSNI	Organismo de Seguridad Nuclear e Industrial
PBq	petabecquerel
Plan Conjunto	Plan Conjunto de las Organizaciones Internacionales para la Gestión de Emergencias Radiológicas
PR	punto de reflexión
RANET	Red de Respuesta y Asistencia
REI	Reunión de Expertos Internacionales
RNRA	refrigeración del núcleo del reactor aislado
SARE	Sistema de Apoyo a la Respuesta a Emergencias
SF-1	Principios fundamentales de seguridad del OIEA
SPEEDI	Sistema de Predicción de Información sobre Dosis Ambientales en Emergencias
Sv	sievert
TEPCO	Compañía de Energía Eléctrica de Tokio
UNSCEAR	Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas
UTC	tiempo universal coordinado
VCP	vasija de contención primaria
WHOI	Woods Hole Oceanographic Institution (Institución Oceanográfica de Woods Hole)

COLABORADORES EN LA REDACCIÓN Y REVISIÓN

Secretaría del OIEA

Gestión del proyecto

Gestor del proyecto

Caruso, G.

Gestores analíticos del proyecto

Bevington, L. (Oficial superior de seguridad)

Boreta, B.

Massegg, V.

Coordinador de gráficos y datos

Zimmermann, M.

Diseñador gráfico

Kasper, M.

Auxiliar de ejecución

Gutiérrez Flores, S.

Auxiliar del grupo

Fitzpatrick, L.

Redactores y editores técnicos

Boemeke, M.

Delves, D.

Harbison, S.

McDonald, A.

Ramesh, G.V.

Robinson, C.

*Secretario Científico de las reuniones
de los Copresidentes*

Webster, S.

Examinadores externos

Alonso, A., España

Gray, R., Reino Unido

Robinson, I., Reino Unido

Simmonds, J., Reino Unido

Webster, P., Canadá

GRUPO DE TRABAJO 1 (GT1): DESCRIPCIÓN Y CONTEXTO DEL ACCIDENTE

Copresidentes

Jammal, R.
Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear
Canadá

Vincze, P.
Departamento de Energía Nuclear
OIEA

Secretario Científico

Heitsch, M. (hasta agosto de 2014)
Departamento de Seguridad Nuclear
Tecnológica y Física
OIEA

Miembros

Dobrzyński, L.
Centro Nacional de Investigaciones Nucleares
Polonia

Dolganov, K.
Instituto de Seguridad Nuclear de la Academia
de Ciencias de Rusia
Federación de Rusia

Duspiva, J.
ÚJV Řež, a.s.
República Checa

Grant, I.
Autoridad Federal de Reglamentación Nuclear
Emiratos Árabes Unidos

Guerpinar, A.
Consultor superior
Turquía

Hirano, M.
Autoridad de Reglamentación Nuclear
Japón

Khouaja, H.
Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear
Canadá

Kim, H.T.
Instituto Central de Investigación de la KHNP
República de Corea

Krijger, H.
N.V. Electriciteits-Productiemaatschappij
Zuid-Nederland
Países Bajos

Lequerica, I.
ENDESA
España

Noel, M.
Centro Común de Investigación de la
Comisión Europea

Orders, W.
Comisión Reguladora Nuclear
Estados Unidos de América

Urzua, G.
AREVA
Francia

Volkholz, P.
AREVA
Francia

Weidenbrück, K.
Ministerio Federal de Medio Ambiente,
Protección de la Naturaleza
y Seguridad Nuclear
Alemania

Weiss, S.
Sociedad para la Seguridad de Instalaciones y
Reactores (Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit gGmbH)
Alemania

Zheng, M.G.
Instituto de Investigación y Diseño de
Ingeniería Nuclear de Shanghai
China

Expertos invitados

Dodo, T.
Instituto de Seguridad Nuclear del Japón
Japón

Ihara, T.
Compañía de Energía Eléctrica de Tokio
Japón

Kanno, M.
Autoridad de Reglamentación Nuclear
Japón

Kawano, A. (hasta agosto de 2013)
Compañía de Energía Eléctrica de Tokio
Japón

Muftuoglu, K.
GE Hitachi Nuclear Energy
Estados Unidos de América

Taira, J.
Compañía de Energía Eléctrica de Tokio
Japón

Yamamoto, M. (a partir de agosto de 2013)
Compañía de Energía Eléctrica de Tokio
Japón

Personal de la Secretaría del OIEA que prestó apoyo al GT1

Kang, K.-S.
Kilic, N.
Pagannone, B.
Yamada, K.
Yoshimoto, Y.

GRUPO DE TRABAJO 2 (GT2): EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD

Copresidentes

Chande, S.
Junta Reguladora de la Energía Atómica
India

Hughes, P. (hasta agosto de 2014)
Departamento de Seguridad Nuclear
Tecnológica y Física
OIEA

Ulses, A. (a partir de agosto de 2014)
Departamento de Seguridad Nuclear
Tecnológica y Física
OIEA

Secretario Científico

Aparkin, F.
Departamento de Seguridad Nuclear
Tecnológica y Física
OIEA

Miembros

Alonso, J. R.
Consejo de Seguridad Nuclear
España

Ayub, M.
Autoridad Reguladora Nuclear del Pakistán
Pakistán

Bucalossi, A.
Centro Común de Investigación de la
Comisión Europea

Chaikiat, P.
Autoridad Sueca de Seguridad Radiológica
Suecia

Dermarkar, F.
Grupo de Proprietarios de Reactores CANDU
Canadá

Foucher, L.
Autoridad de Seguridad Nuclear
Francia

Gauntt, R.
Laboratorios Nacionales Sandia
Estados Unidos de América

Giannelli, I.A.
Slovenské Elektrárne, a.s. (subsidiaria de Enel)
Italia

Godoy, A.R.
James J. Johnson and Associates
Argentina

González, V.
Comisión Nacional de Seguridad Nuclear
y Salvaguardias
México

Harrison, S.
Oficina de Reglamentación Nuclear
Reino Unido

Heppell-Masys, K.
Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear
Canadá

Hoshi, H.
Autoridad de Reglamentación Nuclear
Japón

Kajimoto, M.
Autoridad de Reglamentación Nuclear
Japón

Kuivalainen, H.
Organismo de Seguridad Radiológica y Nuclear
Finlandia

Lankin, M.
Servicio Federal de Supervisión Ambiental,
Industrial y Nuclear
Federación de Rusia

de L'Epinois, B.
AREVA
Francia

Macchi, L.
Dédale
Francia

Mildenberger, O.
Sociedad para la Seguridad de Instalaciones y
Reactores (Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit gGmbH)

Alemania

Misak, J.
ÚJV Řež, a.s.
República Checa

Perryman, L.
Eskom
Sudáfrica

Ryser, C.
Inspección Federal de Seguridad Nuclear
Suiza

Song, J.H.
Instituto de Investigaciones de Energía Atómica
de Corea
República de Corea

Weidenbrück, K.
Ministerio Federal de Medio Ambiente,
Protección de la Naturaleza y
Seguridad Nuclear
Alemania

Expertos invitados y puntos de contacto

Donges, A.
Instituto de Operaciones Nucleares
Estados Unidos de América

Haber, S.
Human Performance Analysis, Corp.
Estados Unidos de América

Harter, R.
Boiling Water Reactors Owners Group
Estados Unidos de América

Hatamura, Y.
Universidad de Tokio
Japón

Ihara, T.
Compañía de Energía Eléctrica de Tokio
Japón

Iino, K.
SYDROSE
Japón

Kunito, S.
Compañía de Energía Eléctrica de Tokio
Japón

Nakagawa, Y.
Compañía de Energía Eléctrica de Tokio
Japón

Takizawa, S.
Compañía de Energía Eléctrica de Tokio
Japón

Watford, G.
GE Hitachi Nuclear Energy
Estados Unidos de América

Yamanaka, Y.
Compañía de Energía Eléctrica de Tokio
Japón

Personal de la Secretaría del OIEA que prestó apoyo al GT2

Beltran, F.
Earle, K.
Haage, M.
Haber, S.
Roveti, B.
Rycraft, H.
Skarbo, B.
Yllera, J.
Yoshimoto, Y.

GRUPO DE TRABAJO 3 (GT3): PREPARACIÓN Y RESPUESTA
EN SITUACIONES DE EMERGENCIA

Copresidentes

Drábová, D.
Oficina Estatal de Seguridad Nuclear
República Checa

Buglova, E.
Departamento de Seguridad Nuclear
Tecnológica y Física
OIEA

Secretario Científico

Shiraga, K.
Departamento de Seguridad Nuclear
Tecnológica y Física
OIEA

Miembros

Aaltonen, H.
Organismo de Seguridad Radiológica y Nuclear
Finlandia

Ahier, B.
Oficina de Protección Radiológica
Canadá

Bardelay, J.
Instituto de Radioprotección y
Seguridad Nuclear
Francia

Blackburn, C.
FAO

Byron, D.[†]
FAO

Chen, P. (hasta junio de 2014)
Organización Meteorológica Mundial

Chugunov, V.
Corporación Estatal de Energía Atómica
“Rosatom”
Federación de Rusia

Cortes Carmona, A.
Comisión Nacional de Seguridad Nuclear
y Salvaguardias
México

Dela Rosa, A.
Instituto Filipino de Investigaciones Nucleares
Filipinas

Harou, A. (a partir de junio de 2014)
Organización Meteorológica Mundial

Hernández, D.
Autoridad Regulatoria Nuclear
Argentina

Homma, T.
Organismo de Energía Atómica del Japón
Japón

Hubbard, L.
Autoridad Sueca de Seguridad Radiológica
Suecia

Kelly, N.
Consultor superior
Reino Unido

Kenigsberg, J.[†]
Comisión Nacional de Protección Radiológica
Belarús

Maree, M.
Eskom
Sudáfrica

McClelland, V.
Departamento de Energía
Estados Unidos de América

Molina, G.
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
México

Pascal, G.
Centro Común de Investigación de la
Comisión Europea

[†]Fallecido

Sigouin, L.
Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear
Canadá

Soufi, I.
Centro Nacional de Energía, Ciencias
y Técnicas Nucleares
Marruecos

Sumargo, D.E.
Organismo de Reglamentación de la
Energía Nuclear
Indonesia

Takahara, S.
Organismo de Energía Atómica del Japón
Japón

de la Vega, R.
Consejo de Seguridad Nuclear
España

Expertos invitados y puntos de contacto

Taminami, T.
Compañía de Energía Eléctrica de Tokio
Japón

Tanigawa, K.
Universidad de Hiroshima
Japón

Tominaga, T.
Instituto Nacional de Ciencias Radiológicas
Japón

Wiley, A.
REAC/TS, Centro Colaborador de la OMS
Estados Unidos de América

Yamashita, S.
Universidad de Nagasaki
Japón

**Personal de la Secretaría del OIEA que prestó
apoyo al GT3**

Callen, J.
Chaput, J.
Kaiser, P.
Martincic, R.
McKenna, T.
Mutluer, A.
Nestoroska Madjunarova, S.
Vilar Welter, P.
Yoshimoto, Y

GRUPO DE TRABAJO 4 (GT4): CONSECUENCIAS RADIOLÓGICAS

Copresidentes

González, A.
Autoridad Regulatoria Nuclear
Argentina

Chhem, R. (hasta agosto de 2014)
Departamento de Ciencias y
Aplicaciones Nucleares
OIEA

Meghzifene, A. (a partir de septiembre de 2014)
Departamento de Ciencias y Aplicaciones
Nucleares
OIEA

Pinak, M.
Departamento de Seguridad Nuclear
Tecnológica y Física
OIEA

Secretario Científico

Müskens, P. (hasta agosto de 2013)
Departamento de Seguridad Nuclear
Tecnológica y Física
OIEA

Bevington, L. (a partir de septiembre de 2013)
Departamento de Seguridad Nuclear
Tecnológica y Física
OIEA

Miembros

Akashi, M.
Instituto Nacional de Ciencias Radiológicas
Japón

Betancourt, A.
Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías
de Avanzada
Cuba

Blumenthal, D.
Administración Nacional de Seguridad
Física Nuclear
Departamento de Energía
Estados Unidos de América

Bromet, E.J.
Universidad del Estado de Nueva York en
Stony Brook
Estados Unidos de América

Brown, J.
Autoridad Noruega de Protección Radiológica
Noruega

Coleman, C.N.
Instituto Nacional del Cáncer
Estados Unidos de América

Demidchik, Y.
Academia Nacional de Ciencias de Belarús y
Academia Médica de Enseñanza de
Posgrado de Belarús
Belarús

Dobrzyński, L.
Centro Nacional de Investigaciones Nucleares
Polonia

Gallego, E.
Universidad Politécnica de Madrid
España

Haquin, G.
Centro de Investigaciones Nucleares de Soreq
Israel

Jones, C.G.
Misión Permanente de los Estados Unidos de
América ante el OIEA en Viena y Comisión
Reguladora Nuclear
Estados Unidos de América

Lee, J.K.
Universidad de Hanyang
República de Corea

Magnusson, S.
Autoridad Islandesa de Seguridad Radiológica
Islandia

Mason, C.
BHP Billiton
Australia

McEwan, A.C.
Consultor superior
Nueva Zelandia

McGinnity, P.A.
Agencia de Protección Ambiental
Irlanda

Ng, K.H.
Universidad de Malaya
Malasia

Niwa, O.
Universidad de Kyoto y Universidad Médica
de Fukushima
Japón

Pentreath, R.J.
Universidad de Reading
Reino Unido

Perrin, M.L.
Autoridad de Seguridad Nuclear
Francia

Rochedo, E.
Coordinación de Instalaciones Nucleares
Brasil

Shinkarev, S.
Agencia Biomédica Federal
Federación de Rusia

Sundell-Bergman, S.
Universidad Sueca de Ciencias Agrícolas
Suecia

Thomas, G.
Imperial College de Londres
Reino Unido

Valentin, J.
Jack Valentin Radiological Protection
Suecia

Expertos invitados y puntos de contacto

Brenner, A.
Instituto Nacional del Cáncer
Estados Unidos de América

Chino, M.
Organismo de Energía Atómica del Japón
Japón

Fukui, T.
Autoridad de Reglamentación Nuclear
Japón

Ivanov, V.
Registro Nacional Radiológico
y Epidemiológico
Federación de Rusia

Makihira, A.
Compañía de Energía Eléctrica de Tokio
Japón

Nagataki, S.
Universidad de Nagasaki
Japón

Ohtsuru, A.
Universidad Médica de Fukushima
Japón

Personal de la Secretaría del OIEA que prestó apoyo al GT4

Harms, A.V.
McGinnity, P.A.

Nies, H.

Osvath, I.

Sakai, K.

Yonehara, H.

GRUPO DE TRABAJO 5 (GT5): RECUPERACIÓN DESPUÉS DEL ACCIDENTE

Copresidentes

Williams, G.
Agencia Australiana de Protección Radiológica
y Seguridad Nuclear
Australia

Mele, I.
Departamento de Energía Nuclear
OIEA

Proehl, G.
Departamento de Seguridad Nuclear
Tecnológica y Física
OIEA

Secretario Científico

Delaunay, N.
Departamento de Seguridad Nuclear
Tecnológica y Física
OIEA

Miembros

Al-Masri, M.S.
Comisión de Energía Atómica de Siria
República Árabe Siria

Balonov, M.
Instituto de Investigaciones Científicas sobre
Radiohigiene de San Petersburgo
Federación de Rusia

Bassanelli, A.
SOGIN, Compañía de Gestión de
Centrales Nucleares
Italia

Brennecke, P.
Consultor superior
Alemania

Darko, E.O.
Comisión de Energía Atómica de Ghana
Ghana

Gallay, F.
Autoridad de Seguridad Nuclear
Francia

Howard, B.J.
Centro de Ecología e Hidrología
Reino Unido

Inoue, T.
Instituto Central de Investigación de la
Industria Eléctrica
Japón

Kifanga, L.D.
Comisión de Energía Atómica de Tanzania
República Unida de Tanzania

Nakayama, S.
Organismo de Energía Atómica del Japón
Japón

Oughton, D.H.
Universidad Noruega de Ciencias de la Vida
Noruega

Rowan, D.
Atomic Energy of Canada Limited
Canadá

Seitz, R.
Laboratorio Nacional de Savannah River
Estados Unidos de América

Tokarevsky, V.
Instituto Chernóbil
Ucrania

Zeleznik, N.
Regional Environmental Center
Eslovenia

Expertos invitados y puntos de contacto

Belencan, H.
Consultor superior
Estados Unidos de América

Negin, C.
Project Enhancement Corporation
Estados Unidos de América

Takizawa, S.
Compañía de Energía Eléctrica de Tokio
Japón

**Personal de la Secretaría del OIEA que
prestó apoyo al GT5**

Izumo, A.
Fesenko, S.
Kumano, Y.
Monken-Fernandes, H.
Sakai, K.
Walker, J.
Yankovich, T.
Yonehara, H.

GRUPO TÉCNICO ASESOR INTERNACIONAL

Presidente

Meserve, R.
Grupo Internacional de Seguridad Nuclear

Secretario Científico

Bevington, L.
Departamento de Seguridad Nuclear
Tecnológica y Física
OIEA

Miembros

Asmolov, V.G.
JSC Concern Rosenergoatom

Carrière, J.M.
Organización Meteorológica Mundial

Clement, C.
Comisión Internacional de Protección
Radiológica

Cousins, C.
Comisión Internacional de Protección
Radiológica

De Boeck, B.
Grupo Internacional de Seguridad Nuclear

Echávarri, L.E. (hasta abril de 2014)
Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE

Ellis, K.
Asociación Mundial de Operadores Nucleares

Fuketa, T.
Grupo Internacional de Seguridad Nuclear

Jamet, P.
Grupo Internacional de Seguridad Nuclear

Kim, M.
Grupo Internacional de Seguridad Nuclear

Laaksonen, J.
Grupo Internacional de Seguridad Nuclear

Le, C.D.
Grupo Internacional de Seguridad Nuclear

Liang, Q.
Organización de las Naciones Unidas para la
Alimentación y la Agricultura

Magwood, W. (a partir de septiembre de 2014)
Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE

Mohammad Jais, A.
Grupo Internacional de Seguridad Nuclear

Niu, S.
Organización Internacional del Trabajo

Sharma, S.K.†
Grupo Internacional de Seguridad Nuclear

Torgerson, D.
Grupo Internacional de Seguridad Nuclear

Weightman, M.
Grupo Internacional de Seguridad Nuclear

Weiss, W.
Comité Científico de las Naciones Unidas para
el Estudio de los Efectos de las
Radiaciones Atómicas

Wiroth, P.
Grupo Internacional de Seguridad Nuclear

Ziqiang, P.
Comisión Internacional de Protección
Radiológica

REUNIONES

Reuniones de los grupos de trabajo (GT)

18 de marzo de 2013
Reunión inicial de los Copresidentes de los GT,
Viena

21 y 22 de marzo de 2013
Primera reunión de todos los GT, Viena

12 a 14 de junio de 2013
Segunda reunión de todos los GT, Viena

12 y 13 de septiembre de 2013
Tercera reunión de los GT 1 y 2, Viena

7 a 9 de octubre de 2013
Tercera reunión de los GT 3, 4 y 5, Viena

9 a 13 de diciembre de 2013
Cuarta reunión de todos los GT, Viena

10 a 14 de febrero de 2014
Quinta reunión de todos los GT, Viena

14 a 17 de abril de 2014
Sexta reunión de los GT 1, 2 y 3, Viena

5 a 9 de mayo de 2014
Sexta reunión del GT 4, Viena

26 a 30 de mayo de 2014
Sexta reunión del GT 5, Viena

Reuniones del Grupo Técnico Asesor Internacional (ITAG)

21 y 22 de marzo de 2013
Primera reunión del ITAG, Viena

10 de junio de 2013
Primera reunión conjunta ITAG/Copresidentes,
Viena

11 de junio de 2013
Segunda reunión del ITAG, Viena

6 de diciembre de 2013
Segunda reunión conjunta ITAG/Copresidentes,
Viena

7 de mayo de 2014
Tercera reunión conjunta ITAG/Copresidentes,
Viena

23 y 24 de octubre de 2014
Cuarta reunión conjunta ITAG/Copresidentes,
Viena

23 y 24 de febrero de 2015
Quinta reunión conjunta ITAG/Copresidentes,
Viena

Reuniones de servicios de consultores

6 y 7 de agosto de 2013
Reunión de servicios de consultores sobre el
término fuente, Viena

29 a 31 de octubre de 2013
Reunión de servicios de consultores sobre
factores humanos y organizativos y cultura
de la seguridad, Viena

17 a 21 de noviembre de 2013
Reunión de servicios de consultores sobre
factores humanos y organizativos y cultura
de la seguridad, Atlanta

13 a 17 de enero de 2014
Reunión de servicios de consultores sobre
factores humanos y organizativos y cultura
de la seguridad, Viena

17 a 21 de marzo de 2014
Reunión de servicios de consultores sobre
factores humanos y organizativos y cultura
de la seguridad, Ottawa

24 a 26 de marzo de 2014
Reunión de servicios de consultores sobre
radiactividad en el medio ambiente, Mónaco

20 y 21 de mayo de 2014
Reunión de servicios de consultores sobre
radiación y distribuciones log-normal, Viena

23 a 27 de junio de 2014
Reunión de servicios de consultores sobre
radiación y distribuciones log-normal, Viena

Reuniones bilaterales celebradas en el Japón

14 a 21 de octubre de 2013

Conversaciones bilaterales sobre cuestiones relacionadas con el informe del OIEA en la esfera de la restauración

25 a 27 de noviembre de 2013

Reunión de servicios de consultores para examinar cuestiones relacionadas con las consecuencias radiológicas para la preparación del capítulo 4 (Consecuencias radiológicas) y el capítulo 5 (Recuperación después del accidente)

25 de noviembre a 4 de diciembre de 2013

Conversaciones bilaterales sobre cuestiones relacionadas con el informe del OIEA en la esfera de la clausura

20 a 24 de enero de 2014

Reunión de servicios de consultores para examinar cuestiones relacionadas con las actividades de reglamentación, la experiencia operacional y la gestión de desechos para la preparación del informe del OIEA

23 de enero de 2014

Reuniones con el Organismo de Reconstrucción y el Grupo Encargado de prestar Asistencia a las Víctimas del Desastre — Oficina del Gabinete

24 de enero de 2014

Reuniones con el Instituto de Economía de la Energía del Japón

DERECHOS DE AUTOR

Todas las publicaciones científicas y técnicas del OIEA están protegidas en virtud de la Convención Universal sobre Derecho de Autor aprobada en 1952 (Berna) y revisada en 1972 (París). Desde entonces, la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (Ginebra) ha ampliado la cobertura de los derechos de autor que ahora incluyen la propiedad intelectual de obras electrónicas y virtuales. Para la utilización de textos completos, o parte de ellos, que figuren en publicaciones del OIEA, impresas o en formato electrónico, deberá obtenerse la correspondiente autorización, y por lo general dicha utilización estará sujeta a un acuerdo de pago de regalías. Se aceptan propuestas relativas a reproducción y traducción sin fines comerciales, que se examinarán individualmente. Las solicitudes de información deben dirigirse a la Sección Editorial del OIEA:

Dependencia de Mercadotecnia y Venta
Sección Editorial
Organismo Internacional de Energía Atómica
Vienna International Centre
PO Box 100
1400 Viena (Austria)
fax: +43 1 2600 29302
tel.: +43 1 2600 22417
correo electrónico: sales.publications@iaea.org
<http://www.iaea.org/books>

©OIEA, 2015

Impreso por el OIEA en Austria
Agosto de 2015
STI/PUB/1710

NOTA EDITORIAL

El presente Informe del Director General se basa en la información detallada que figura en los volúmenes técnicos. Su contenido no refleja necesariamente las opiniones de los Estados Miembros del OIEA o de las organizaciones que designaron expertos para integrar los grupos de trabajo que prepararon los volúmenes técnicos.

Se ha puesto gran cuidado en mantener la exactitud de la información que se ofrece en este informe. Sin embargo, ni el OIEA ni sus Estados Miembros asumen responsabilidad alguna por las consecuencias que puedan derivarse de su uso. Tampoco se ofrecen garantías de ningún tipo en relación con el informe.

Este informe no tiene por objeto abordar cuestiones de responsabilidad, jurídica o de otra índole, por los actos u omisiones de ninguna persona o entidad.

Podrán reproducirse libremente fragmentos de este informe, siempre que se mencione la fuente. Sin embargo, en el caso de la información (incluidas las fotografías y los gráficos) que aparece atribuida a una fuente o un sitio externos al OIEA, deberá solicitarse el permiso de la fuente originaria para reutilizar el material.

El uso de determinadas denominaciones de países o territorios no implica juicio alguno por parte del OIEA sobre la situación jurídica de esos países o territorios, sus autoridades e instituciones o el trazado de sus fronteras.

La mención de nombres de empresas o productos específicos (se indiquen o no como registrados) no implica ninguna intención de violar derechos de propiedad ni debe interpretarse como una aprobación o recomendación por parte del OIEA.

El OIEA no asume responsabilidad alguna por la exactitud o continuidad de las URL de los sitios web externos o de terceros en Internet a que se hace referencia en este informe y no garantiza que el contenido de dichos sitios web sea o siga siendo exacto o adecuado.



IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

PO Box 100, Vienna International Centre
1400 Viena (Austria)

Impreso en Austria

GC(59)/14