

Energía Nuclear en el Perú

Modesto Montoya

January 28, 2007

Capítulo 1

Capítulo 2

Capítulo 3

Capítulo 4

Capítulo 5

Capítulo 6

Capítulo 7

Capítulo 8

Capítulo 9

Capítulo 10

El autor

Modesto Montoya, Magister en Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, UNI (1975), Doctor de Tercer Ciclo (1977) y Doctor de Estado en Física Nuclear (1981) de la Universidad París XI, Francia, es profesor principal de la Facultad de Ciencias de la UNI y Director General de Promoción y Desarrollo Tecnológico del Instituto Peruano de Energía Nuclear. El Dr. Montoya es, además, fundador y director del Centro de Preparación para la Ciencia y Tecnología (CEPRECYT), Presidente de la Sociedad Peruana de Física (SOPERFI) y de la Sociedad Peruana de Ciencia y Tecnología (SOPECYT).

Su trabajo científico en el área nuclear lo desarrolló en la UNI, en la Comisión de Energía Atómica (CEA) y en el Centro Nacional de Investigación Científica (CNRS) de Francia, en el Centro de Estudios Nucleares de Jülich y el Instituto de Investigaciones Nucleares (GSI) de Darmstadt de Alemania, en el Instituto Carnegie-Mellon de EEUU y en el Instituto Peruano de Energía Nuclear. Su especialidad es la fisión nuclear y las interacciones de los neutrones con la materia con fines de aplicación.

Ha participado como expositor en numerosos eventos científicos en diversos países y publicado en revistas científicas internacionales. Es editor de la Revista Nuclear del Perú y de la Revista Peruana de Física.

La energía nuclear ha causado mucho beneficio a la Humanidad en el dominio de la medicina, agricultura, industria, recursos naturales, energía y de las ciencias básicas. Sus aplicaciones en todos los sectores de las actividades humanas son ampliamente difundidas. Sin embargo, el temor hacia la energía nuclear sigue presente, debido principalmente a que fue espectacular y terroríficamente utilizada para fines bélicos en la segunda guerra mundial.

El autor trata de poner las cosas en su verdadera dimensión y mostrar ala forma en que un país del Tercer Mundo como el Perú está usando tecnología avanzada en el dominio nuclear, lo que puede aprovecharse para activar todos los aspectos del desarrollo integral del país.

Tecnología Nuclear en el Perú

Modesto Montoya

Tecnología Nuclear en el Perú

Primera edición, Octubre de 1993
1 000 ejemplares

©1993 *Modesto Montoya*

Dirección:

Centro de Preparación para la Ciencia y Tecnología
CEPRECYT
Diez Canseco 762, Miraflores, Lima, Perú
teléfono 471302

Impreso en Trujillo, Perú

A mis padres

Presentación

Este libro intenta dar una idea de la forma cómo la ciencia y la tecnología nucleares irrumpieron en la historia de la humanidad -cambiando su curso como jamás otro dominio de las actividades humanas lo había hecho- y el estado en que se encuentran desarrolladas en el Perú.

Se comienza describiendo lo que empezó a suceder rápidamente a partir de fines del siglo XIX con el descubrimiento de la radiactividad natural.

Luego se recuerda la intensa actividad nuclear que sostuvieron los científicos desde 1939, cuando se perfilaba la terrible segunda guerra mundial, descubriéndose el fenómeno de la fisión nuclear, que permitiría construir la bomba atómica, usada por los Estados Unidos para destruir dos ciudades japonesas. Este hecho deja una marca indeleble en la memoria colectiva, creando un justificado temor hacia la liberación incontrolada de esa insospechada liberación de energía.

Veremos cómo la bomba atómica se convierte en la obsesión de los países que persiguen -y algunos logran- la construcción de sus propias bombas, creando un ambiente de inestabilidad nuclear a nivel mundial.

También se presentarán las diversas aplicaciones pacíficas de las ciencias nucleares, las que son impulsadas y promovidas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), creado para ese propósito por la Organización de las Naciones Unidas.

Luego se hará referencia a las aplicaciones nucleares desarrolladas en el Perú, tendientes a resolver diversos problemas nacionales en el dominio de la medicina, agricultura, industria, hidrología, geofísica, sismología, vulcanología y medio ambiente, entre otros campos.

Se identificarán los equipos científicos que desarrollan estos temas en el Perú, así como las instituciones involucradas en el desarrollo nuclear peruano.

Los temas que aparecen en este documento son los que se están desarrollando en el Perú. Ello deja de lado numerosos campos de las ciencias nucleares, como los relacionados con los aceleradores de iones y la física de altas energías.

Indice

1 La Era Nuclear	15
1.1 Los átomos	15
1.2 La radiactividad natural	17
1.3 La radiactividad artificial y la fisión	18
1.4 La reacción en cadena	18
1.5 Los Alamos, cuna de la bomba	19
1.6 Carrera contra el tiempo	22
1.7 El camino a la bomba atómica continúa	23
1.8 La hora cero	24
1.9 Lluvia radiactiva	27
1.10 La puntería atómica hacia Japón	27
1.11 Crisis de conciencia	29
2 Carrera Armamentista Nuclear	31
2.1 El inicio de la carrera	31
2.2 Jugando con fuego nuclear	33
2.3 Los tigres del Asia	34
2.4 Carrera nuclear en América Latina	35
2.4.1 Argentina	35
2.4.2 Brasil	37
2.5 Perspectivas y temores nucleares en América Latina	38
3 La Energía Nuclear en el Perú	39
3.1 La organización	39
3.2 Centro de Estudios Nucleares de San Borja	40
3.3 Centro de Medicina Nuclear	41
3.4 Centro Nuclear “RACSO” de Huarangal	42
3.5 El reactor de investigaciones RP-10	43

3.6	Posiciones de irradiación del RP-10	44
3.7	Laboratorios de física aplicada	45
3.8	Análisis por activación neutrónica (AAN)	46
3.9	Planta de producción de radioisótopos (PPR)	46
3.10	Planta de tratamiento de desechos	47
3.11	Laboratorios de protección radiológica	47
3.12	La planta de irradiación multiuso (PIMU)	48
4	Medicina Nuclear	49
4.1	Radiofármacos	49
4.2	Imágenes en medicina	51
4.3	La década del cerebro	54
4.4	Radioterapia	55
4.5	Medicina nuclear en el Perú	56
4-A	Apéndice: Dosimetría y riesgos radiológicos	63
5	Agricultura y Alimentación	66
5.1	Demografía y alimentos	66
5.2	Mutación genética de plantas	68
5.3	Cultivos bajo condiciones extremas	70
5.4	Irradiación de alimentos para la conservación	74
5.5	Historia de una planta de irradiación	77
6	Aplicaciones Nucleares en la Industria	81
6.1	Radiotrazadores	81
6.2	Instrumentos nucleares	83
6.3	Ensayos no destructivos en el Perú	86
7	Hidrología	90
7.1	Perspectivas de desabastecimiento de agua	90
7.2	Aguas subterráneas	91

7.3 Hidrología isotópica en el Perú	93
7.4 Agua para Lima	93
7.5 Análisis isotópico del acuífero de Lima	94
7.6 El providencial túnel Graton	95
7.7 Trazadores artificiales	96
7.8 Análisis isotópico	97
7.9 Hidrología en Proyecto Pasto Grande	98
7-A Apéndice: Los isótopos estables del agua	100
8 Ciencias de la Tierra	101
8.1 Historia de la Tierra	101
8.2 Agua y aire	104
8.3 Los sismos	105
8.4 Riesgos volcánicos de la región de Arequipa	107
8.5 Datación de rocas volcánicas	108
8.6 Análisis de muestras geológicas	110
8.7 Geología del uranio	110
8-A Apéndice: Datación del vulcanismo de Macusani	111
9 Tecnología y Medio Ambiente	113
9.1 Los desastres a mediano plazo	113
9.2 Electricidad y medio ambiente	114
9.3 Aumento inexorable de consumo de energía	115
9.4 Riesgos energéticos	116
9.5 ¿Qué tipo de producción energética instalar?	117
9.6 Biodiversidad	118
9.7 Centro Nuclear “RACSO” y medio ambiente	120
9.8 Las consecuencias de Chernobil	123
9.9 Emergencias radiológicas en el Perú	124
9.10 Radiaciones y control biomédico	124

10 Perspectivas Nucleares del Perú	126
---	------------

Bibliografía	129
---------------------	------------

Chapter 1

La Era Nuclear

1.1 Los átomos

El filósofo griego Demócrito fue uno de los que inventaron el concepto de átomo, el mismo que duró en la historia hasta el siglo XVIII, explicando las propiedades químicas de los cuerpos. Gay-Lussac, Dalton, Ampere, Avogadro, entre otros, trabajaron con esa idea.

Según los filósofos griegos, la materia es un conglomerado de corpúsculos elementales, cuya organización da lugar a las diversas sustancias químicas. Estos corpúsculos llamados átomos son indivisibles y eternos. A fines del siglo XIX se vio una serie de descubrimientos que cambiaron la visión que se tenía sobre la composición de la materia.

Joseph Thomson descubrió el electrón (1897), Ernest Rutherford estableció que los átomos están compuestos de un núcleo en el centro, cargado positivamente y muy pesado (1911) y Niels Bohr propone el modelo atómico según el cual los electrones giran alrededor del núcleo. James Chadwick descubre el neutrón en 1932, completando las partículas componentes del átomo.

Los átomos están compuestos por un núcleo formado por Z protones y N neutrones, alrededor del cual giran Z electrones, haciendo una especie de sistema planetario. Cada protón tiene una carga positiva (e) y cada electrón tiene una carga negativa ($-e$). El número atómico, Z , define las propiedades químicas de los cuerpos.

El átomo más simple es el hidrógeno ($Z = 1$ y $N = 0$) y el átomo natural más pesado es el uranio ($Z = 92$). Existen átomos más pesados, pero que

han sido creados en los laboratorios.

Los átomos del mismo elemento tienen el mismo número atómico Z , pudiendo tener diferentes valores de N , dando lugar a los llamados isótopos del elemento. Por ejemplo, el hidrógeno tiene tres isótopos: el hidrógeno liviano ($Z = 1, N = 0$), el hidrógeno pesado o deuterio ($Z = 1$ y $N = 1$) y el tritio ($Z = 1$ y $N = 2$). Este último es radiactivo. Un isótopo es definido por el nombre y el número A , que es la suma de Z y N . Por ejemplo, el uranio con 146 neutrones puede ser señalado como uranio 238 ($= 92+146$). Se puede identificar un isótopo con el símbolo ${}^A Ab$, donde Ab es la abreviación del nombre del elemento. Por ejemplo el uranio 238 es expresado como ${}^{238}\text{U}$.

Para tener una mejor idea del mundo ultra microscópico descubierto por los científicos del siglo XX, hagamos un ejercicio de imaginación. Supongamos que todas las cosas comienzan a crecer, guardando las relaciones entre sus tamaños (esto quiere decir que algo que es dos veces más alto que otro seguirá siéndolo, aunque ambos tomen tallas elevadas; así, entre ellos no existirá diferencia alguna). Si se aumenta el tamaño al doble de lo normal, un hombre medirá unos 3,30 metros, pero las habitaciones de las casas tendrán una altura de 4,6 metros, y los autobuses 6 metros. De modo que no habrá ningún problema para que un hombre entre en un autobús.

Pero supongamos que todo aumenta de tamaño salvo nosotros. En este caso, cuando todo haya crecido a una talla 1 000 veces mayor, habrán edificios de 30 km de alto y las hormigas tendrían nuestro tamaño: podríamos ser presa fácil de esos insectos.

Cuando todo haya crecido $1\,000 \times 1\,000$ veces estaremos en el mundo de los microbios, descubriendo tipos de vida nunca vistos. Verdaderos monstruos tratando de atacarnos.

Siguiendo nuestro ejercicio, el mundo crece 1 000 veces mayor. Podríamos pasar entonces a través de microbios gigantes, cuya forma nos sería difícil de imaginar.

Si nos encontráramos sobre un metal, veríamos interminables formaciones geométricas de esferitas. Sobre el metal, el mundo sería geométrico, formado por esferas unas diez veces más grandes que nosotros. Esas esferitas no parecen sólidas; en realidad, se ve una nube de electrones que giran a una velocidad de unos billones de veces por segundo.

Nos preguntamos ¿qué cosa hace que los electrones giren alrededor de un centro, en el que aparentemente no hay nada? Para tener posibilidad de ver algo, hacemos que el mundo crezca a una talla mil veces más. La

talla de las cosas, en suma, habrá crecido en un factor 1 000 000 000 000 de la normal. Nosotros, como hemos acordado, guardamos nuestro tamaño inicial. Nos encontramos en la parte externa de un átomo, el que aparece como un vacío casi absoluto. Dado que los electrones giran alrededor de un centro, nos dirigimos a ese centro, en un vacío desolador. Después de avanzar 100 km, encontramos una esfera de nuestra talla, a la que llamamos núcleo. Descubrimos que esta esfera también es difusa, compuesta por dos tipos de partículas -protones y neutrones- que se mueven a gran velocidad dentro de las fronteras del núcleo. Si quisiéramos visitar el más cercano de los otros núcleos, ¡tendríamos que desplazarnos 200 km!

Descubrimos también que la masa del átomo está prácticamente concentrada en el núcleo, y que los electrones tienen una pequeña fracción de la masa de los protones y neutrones.

1.2 La radiactividad natural

El físico Henri Becquerel (1852-1908), descubrió (1896) la radiactividad natural en sales de uranio. Becquerel estudiaba la fluorescencia de sales de uranio después de ser sometidas a la luz solar, observando que, aún sin haber iluminado con luz solar, las sales afectaban una placa fotográfica, debido a la emisión de “rayos uránicos”. El estudio de estos rayos mostró que habían tres tipos de radiactividad:

- Rayos alfa, cargados positivamente, poco penetrantes, que luego serían identificados por Ramsay y Soddy como núcleos de helio ($Z = 2$, $N = 2$);
- Rayos beta, cargados negativamente, que Thomson identificaría como electrones;
- Rayos gamma, sin masa, de la misma naturaleza que los rayos X y la luz, pero más penetrantes y energéticos.

Estos rayos ionizan la materia, es decir sacan los electrones de los átomos que se encuentren en el vecindario de su trayectoria. Ello conlleva riesgos para los seres vivos, porque produce modificaciones en las estructuras que dan lugar a la vida.

Descubierta la radiactividad natural se abrió un horizonte de rica experimentación. Pierre Curie y Marie Sklodowska aislan el polonio y el radio

(1989) -ambos radiactivos- de varias toneladas de residuos de pechblenda (minerales de uranio).

1.3 La radiactividad artificial y la fisión nuclear

El descubrimiento de la radiactividad aceleró los trabajos de investigación sobre la materia. Los científicos trabajaban sin descanso en sus laboratorios. Así llega el descubrimiento del neutrón por Chadwick, que da lugar a un medio para escudriñar la materia con mayor profundidad.

Viene entonces el descubrimiento de la radiactividad artificial por Frederic e Irene Joliot-Curie. Los Joliot producen un isótopo radiactivo del fósforo, bombardeando una lámina de aluminio con una fuente de neutrones.

Enrico Fermi irradia con neutrones todos los cuerpos conocidos. Irradiando el uranio con neutrones, Fermi esperaba formar átomos más pesados que los encontrados en la naturaleza. Sin embargo, la complejidad de sus experimentos no le permitió convencer a sus colegas.

Irene Joliot-Curie logra identificar un cuerpo como lantano, producido en sus experimentos de irradiación con neutrones del uranio. Pero el lantano es menos pesado que el uranio, creándose confusión, dado que se esperaba cuerpos más pesados que el uranio. Los científicos alemanes Otto Hahn y Frederik Strassmann identifican bario entre los productos de la reacción. En diciembre de 1938, Lise Meitner y Otto Frish interpretan el fenómeno de la fisión, como la fragmentación del átomo de uranio por acción de los neutrones.

Para los científicos, en la navidad de 1938, el mundo era otro. Ese mundo, con sus paisajes y sus seres vivientes, construido durante 15 mil millones de años, acababa de descubrir un fenómeno físico que podría destruir todo en unos cuantos segundos.

En la obra “La Guerra del Fuego” se describe la forma cómo el fuego era guardado como un secreto vital por las tribus primitivas. En forma similar, a partir de 1939, cuando el fantasma de la guerra se materializaba, los laboratorios de física se convirtieron en secretos, donde se sospechaba que estaban construyendo la bomba nuclear.

1.4 La reacción en cadena

En enero de 1939, Frederic Joliot, Von Halban y Kowarski muestran que en cada fisión de uranio, en promedio, se produce tres nuevos neutrones. Inmediatamente se dan cuenta de las posibilidades de la llamada reacción en cadena: un neutrón fisiona un átomo de uranio, generándose tres neutrones, los que fisionarán tres átomos de uranios, etc. Para que esa reacción en cadena sea posible, era necesario idear configuraciones apropiadas que impidieran la pérdida de neutrones, que provocaría el fin de la reacción en cadena.

La fisión del uranio libera grandes cantidades de energía, que se traduce en calor. La energía liberada en una fisión nuclear es millones de veces más elevada que la correspondiente en una reacción química. La energía liberada en una fisión proviene de la diferencia entre la masa del núcleo inicial, uranio, y la suma de las masas de los productos de fisión, siguiendo la teoría de Albert Einstein de equivalencia masa energía.

La energía liberada en la fisión nuclear es la que se usa en los reactores nucleares o en la bomba atómica. En su famosa carta del 2 agosto de 1939, dirigida al Presidente de los Estados Unidos, F.D. Roosevelt, Albert Einstein dice: “En el curso de los últimos cuatro meses se ha convertido en probable la posibilidad de provocar una reacción nuclear en cadena en una gran cantidad de uranio, por intermedio de la cual puede generarse una vasta cantidad de energía y grandes cantidades de nuevos elementos radiactivos. Ahora parece casi cierto que esto sería logrado en un futuro inmediato”. Einstein explica en su carta: “Este nuevo fenómeno permitiría construir bombas, y es concebible -aunque con mucho menos certeza- que de esa forma puede construirse bombas extremadamente potentes”.

Como para dar una idea de la potencia de la referida bomba, el célebre científico añade: “Una simple bomba de este tipo, transportada y detonada en un bote, puede muy bien destruir un puerto, junto con algo de sus territorios aledaños. Sin embargo, tales bombas pueden convertirse en muy pesadas para trasportarlas por aire”.

La carta de Einstein muestra que los científicos de la época estaban convencidos, aunque no firmemente, de la factibilidad técnica de bomba atómica.

Por otro lado, en la última parte de su carta, Einstein deja traslucir su temor ante la eventualidad que los nazis estuvieran construyendo la bomba

atómica. Los nazis habían interrumpido la venta de uranio (material combustible para la bomba) proveniente de las minas de Checoslovaquia, la que habían invadido.

El temor de la bomba nazi fue ciertamente lo que movilizó a muchos científicos a pensar en su construcción en territorio aliado. En todo caso, como lo afirma Victor Weisskopf¹, fue la razón principal para la mencionada movilización científica. Por ejemplo, Enrico Fermi, el físico italiano mencionado por Einstein en su carta, partió hacia los Estados Unidos, como consecuencia de las leyes racistas (julio 1938) promulgada por el gobierno fascista de su país (La esposa de Fermi, de origen judío, fue considerada, repentinamente, como ciudadana de segunda categoría). Fermi, como otros científicos, deducían las consecuencias de un eventual triunfo nazi.

Otro caso es el propio Einstein, quien partió hacia los Estados Unidos ante la continúa presión y mortificación producida por los nazis por el hecho de ser judío.

En 1942, Fermi y sus colegas realizan la primera reacción en cadena, en Chicago, en el marco de un proyecto secreto. Los científicos de Chicago, avanzaban febrilmente, con la angustia de no saber a ciencia cierta el estado de las investigaciones de los físicos alemanes al servicio del nazismo. En cierto modo, se supo que los nazis se enteraron del trabajo secreto de Chicago, puesto que el científico Dr. Houtermans, de Suiza, les envió el cable que decía “Rápido, estamos sobre el rastro”.

Se dice que la carta de Einstein fue concebida por Leo Szilard, quien conformaba el grupo de científicos europeos exiliados en los Estados Unidos. Dado que se temía que la carta no llegue a manos del Presidente de los Estados Unidos, la recomendaron con el economista Alexander Sachs. Todos parecían decididos a seguir hasta el final con la derrota del nazismo.

En la respuesta de Roosevelt se nota la decisión de apoyar el proyecto que daría lugar a la bomba atómica: “He encontrado que los datos son de tal importancia que he convocado un Consejo integrado por el jefe del *Bureau for Standards* y he escogido representantes del Ejército y la Marina para investigar cuidadosamente las posibilidades de vuestra sugerencia relacionada con el uranio”. En su carta, Einstein le sugería que los Estados Unidos se provean de uranio como punto de partida de un proyecto conducente a la bomba atómica.

¹ *Coloquio Internacional sobre la Historia de la Física de Partículas*, Julio 1982, *Journal de Physique*, C8-1982, 1982

Los científicos europeos habían actuado con mucho temor en lo que ellos llamaron “una conspiración”. Después de todo, estaban en territorio extranjero, y aunque ellos eran los artífices de muchos de los descubrimientos de la fisión atómica, no se sentían en casa. El Gobierno norteamericano, por su lado, temía apoyar masivamente la recomendación de esos científicos nacidos en el extranjero, debido a una eventual investigación decidida por el Congreso.

El gobierno de los Estados Unidos respondió en la práctica, en 1942, otorgando 6 000 dólares que servirían para aumentar los esfuerzos de investigación de las universidades y para organizar conferencias de física atómica.

En 1942 nace el embrión científico-militar con el nombre de “Cuerpo de Ingenieros del Ejército del Distrito de Manhattan”. El físico Robert Oppenheimer, de la Universidad de California, aparece como el más indicado para dirigir a estos científicos listos para empezar la más espectacular y controvertida aventura, cuya proyección hacia el futuro era impredecible.

Oppenheimer, hijo de un inmigrante alemán, estudió en la Universidad de Harvard. Después de graduarse, en 1925, partió a la Universidad de Göttingen, en Alemania, donde se doctoró. Oppenheimer visitó los centros científicos de Leiden y Zurich, luego regresó a los Estados Unidos para enseñar física en la Universidad de California. Como puede verse, contaba con una experiencia importante en el trato con científicos de nivel internacional, con quienes tenía que trabajar en el futuro proyecto Manhattan.

Además de ser un científico brillante, Oppenheimer se interesó en la política, cuando empezó el ascenso del nazismo. En 1936 se puso del lado de la República durante la guerra civil española. Esto lo llevaría a conocer varios estudiantes comunistas, lo que sería usado más tarde como pretexto para desprestigiarlo.

El Director de la Oficina de Investigación Científica y Desarrollo de los Estados Unidos, Vannevar Bush, escribió (25 de febrero de 1943) una carta secreta a Robert Oppenheimer, nombrándolo oficialmente director del “Laboratorio Especial de Nuevo Mexico que sería encargado del desarrollo y fabricación de un instrumento de guerra, el cual podemos designarlo como Proyecto S-1-T”.

1.5 Los Alamos, cuna de la bomba

Los científicos modernos se reúnen muy a menudo para intercambiar ideas, lo que les permite avanzar en sus propias investigaciones. El libre flujo de ideas es la base del éxito científico obtenido en el siglo XX. Acostumbrados a tal libertad, mal podía concebirse la construcción de un laboratorio donde se restringa las discusiones, conferencias, seminarios, etc. Pero, por otro lado, debido a la naturaleza del proyecto, las investigaciones debían mantenerse en el máximo secreto. ¿Cómo resolver este dilema?. Oppenheimer lo hizo escogiendo un lugar discreto llamado Los Alamos, a unos treinta km de la pequeña ciudad de Santa Fe, en el Estado de Nuevo México.

Los habitantes de Santa Fe no imaginaban que a unos treinta km se construía la bomba atómica, en los Alamos, expropiado por el Ejército norteamericano, que pasaba como un alojamiento para las mujeres embarazadas del Cuerpo Femenino del Ejército.

En el laboratorio de Los Alamos, los científicos vivían como en otro mundo, secreto, desconocido por el resto de los mortales. Música, deportes y una variada gama de actividades fueron organizadas para atenuar la tensión en la que vivían los inquilinos de Los Alamos, acostumbrados a una vida urbana internacional.

A pesar de los enormes esfuerzos del FBI para impedir que agentes extranjeros se enteren del trabajo de Los Alamos, un espía nazi fue identificado dentro de los laboratorios. Sin embargo, el FBI controló las comunicaciones de ese espía, llamado Klaus Fuchs. Así pudo saberse que el Gobierno nazi le pedía informaciones precisas. ¿Donde se produce el agua pesada? ¿en qué cantidad? ¿qué método? ¿quiénes son sus usuarios?. El Gobierno nazi le preguntaba, asimismo, ¿qué laboratorios manipulan grandes cantidades de uranio? ¿en qué consiste la protección contra los rayos neutrónicos? ¿se fabrica barras metálicas de uranio?. Estas preguntas demostraban que los nazis estaban enterados de los trabajos realizados para construir la bomba atómica.

1.6 Carrera contra el tiempo

La carrera hacia el arma máxima parecía reñida, aunque no se conocía con precisión el estado del avance de los científicos al servicio del nazismo. Recordemos que el fenómeno de fisión nuclear, sobre el que se basa la

construcción de la bomba, fue descubierto por científicos alemanes. Los científicos alemanes que se refugiaron en los Estados Unidos eran los que más temían esa posibilidad.

Alemania tenía una muy rica tradición científica, centrada en Berlín. Los científicos alemanes, Rudolph Peiersl y Otto Frisch, refugiados en Inglaterra en la primavera de 1940, mostraron cómo se puede construir una bomba atómica en unos cuantos años. Ellos se dieron cuenta que la bomba podía hacerse seleccionando una modesta cantidad de uranio 235 a partir del uranio natural. Sus cálculos mostraban el proceso de la cadena de reacción. Los científicos ingleses fueron convencidos y éstos lograron el apoyo de su gobierno. Los científicos que trabajaban en los Estados Unidos vieron ese apoyo como la muestra de la seriedad del proyecto.

Así pues, a su vez, el Gobierno norteamericano decidió brindar los recursos necesarios para la ejecución del proyecto Manhattan. La carrera contra el tiempo producía ansiedad en los científicos que participaban en las investigaciones. Varios de ellos temían que en cualquier momento caería la bomba nazi sobre Londres... o sobre alguna ciudad norteamericana. En un informe oficial, en 1941, el físico Arthur Compton escribía: “Si una nación tiene la bomba de fisión sus vecinos están a su merced” ... “Una nación como los Estados Unidos, protegida por los océanos, podría mantenerse durante algunos meses”, afirmaba Compton, quien concluía: “Si una nación enemiga construyera la bomba de fisión antes que nosotros, no vemos en qué forma podríamos defendernos... El uso de la bomba de fisión puede decidir la presente guerra.”

Pero, finalmente, el nazismo cayó sin necesidad de bomba. A mediados de abril de 1945, el Ejército de la Unión Soviética y Polonia se encontraban a unos cien km al este de Berlín, mientras que el ejército de Estado Unidos se encontraba aproximadamente a la misma distancia hacia el Oeste. El 25 de abril Berlín es rodeado por el Ejército Rojo y el ejército polaco, que lo destruyeron con un bombardeo aterrador. Hitler se suicida. Göbbels y el secretario del Partido Nazi tratan de negociar con los soviéticos. Ante la negativa, Göbbels sigue el camino de Hitler: se pega un tiro con su propia pistola.

Alemania había sido destruída. Sus ruinas se convirtieron en un monumento a la irracionalidad. El 7 de mayo a las 2:41 de la madrugada, los nazis firmaban su rendición. Esta se mantuvo en secreto. El anuncio oficial fue dado a conocer el 8 de mayo de 1945.

1.7 El camino a la bomba atómica continúa

El 4 de mayo, días después de los suicidios de Hitler y Göbbels, el secretario de Guerra de los Estados Unidos, Robert Patterson, hace circular un mensaje en el laboratorio de Los Alamos. Uno de los párrafos de dicho mensaje es el siguiente: “La importancia de este proyecto no terminará con el colapso de Alemania. Tenemos que ganar la guerra contra Japón. El trabajo que ustedes están haciendo debe continuar sin interrupción ni retardo, y debe continuar como secreto militar”. Luego, en ese documento se nota una arenga: “Tenemos que devolver a los japoneses sus brutalidades y asesinatos masivos de civiles sin defensa y prisioneros de guerra”. El Gobierno norteamericano estaba decidido, según se lee en ese documento, a no cejar hasta que “ellos sean completamente aplastados”. Ustedes -dice el secretario de Guerra- “desempeñarán un importante rol en su derrota”. De modo que, ahora, la bomba apuntaría a Japón. ¿Cómo reaccionaron los científicos del laboratorio Los Alamos? El británico Joseph Toblat había ido a Los Alamos para derrotar a los nazis. “Ahora que la bomba no tiene que ver con eso, no tengo derecho a continuar”, dijo el científico. Los demás se quedaron.

En los Estados Unidos, los científicos que no participaron en Los Alamos tenían cierto conocimiento de los trabajos de ese laboratorio. Hubo incluso una petición para que la bomba atómica no sea usada en Japón. Algunos sugirieron que se haga una demostración en un territorio no habitado, para disuadir a los japoneses de continuar la guerra.

1.8 La hora cero

Como faltaban los últimos detalles para la culminación del proyecto Manhattan, aún después de la derrota del nazismo, muchos científicos de Los Alamos seguramente sintieron la necesidad de culminar su obra. Todo estaba casi listo para la prueba. Debí buscarse el lugar apropiado para la primera explosión, que debería ser secreta. No querían correr el riesgo de un fiasco frente al mundo. El lugar de la prueba tenía que ser aislado para evitar riesgos de víctimas. El lugar debía ser una planicie para ver la explosión desde lejos y evitar efectos extraños en una topografía accidentada; debía estar lo más cercana posible al laboratorio Los Alamos, para ganar tiempo en el transporte; debía gozar de un clima bueno, sin nubes o polvo para facilitar la visibilidad.

Finalmente, el lugar escogido fue el área de bombardeo de Alamogordo. El área tenía la ventaja de pertenecer al Gobierno y era plano y seco. El lugar más cercano se encontraba a unos 18 km, el pueblo más cercano Carrizozo, estaba a 15 km y los Alamos a 320 km. El lugar se llamaba “La Jornada del Muerto” debido al paisaje árido que presentaba.

Las pruebas se vieron empañadas de dificultades técnicas. El contenedor de la bomba tenía que resistir la explosión de una bomba de implosión que permitiera concentrar el material nuclear a una geometría crítica. Las primeras estimaciones indicaban que su peso sería de más de 200 toneladas. El contenedor respondía a la necesidad de recuperar el material en caso de un fracaso en la prueba de explosión de la bomba atómica.

En febrero de 1945, el laboratorio estaba en plena movilización. Washington presionaba para que se cumplan los plazos. Se realizó una conferencia en la que se decidió abandonar el programa de implosión y concentrarse en uno de los métodos que estaban siendo investigados. La conferencia confeccionó un calendario de trabajo, en el cual se fijaba el 4 de julio como la fecha de la prueba, cuyo nombre fue *Trinidad*.

Usando las informaciones de cada grupo, en particular el de las condiciones climatológicas, el 30 de junio se decidió que la prueba final se haría el 16 de julio. Grandes expectativas y dudas reinaban en esos días en el laboratorio. En algunas reuniones, la depresión se apoderaba de los científicos ante las dificultades técnicas que aparecían. El físico Frederick Reines, recordando una de las conferencias realizadas al respecto, durante esos días cruciales, declara: “Pareció como que si sintiéramos no haber comprendido nada. Tantas eran las dudas sobre si la bomba funcionaría, que día y noche los físicos pensaban una y otra vez sobre sobre los detalles científicos y técnicos en torno a la bomba”. Esa angustia sólo se disiparía el 16 de julio.

Al mismo tiempo que se preparaba la prueba final de la explosión atómica, también se realizaba el entrenamiento para el lanzamiento de la bomba a partir de un avión. Esto era debido a la posibilidad de dejarla caer en Japón.

No era raro para los miembros del proyecto Manhattan trabajar 24 horas al día en la parte final de la prueba. El día 15 de julio, entre las 9 y las 10 se realizó una inspección general de las instalaciones. A las 5:00 a.m. del 16 de julio empezó la cuenta regresiva. Durante toda la noche se esperaba el más grande espectáculo jamás visto.

A los 45 segundos antes de la explosión predicha se inició el proceso automático. Desde ese momento, los eventos estaban fuera de control humano.

A las 5 hrs 29 minutos y 45 segundos del 16 de julio de 1945, se produjo una increíble explosión de luz que bañó las montañas circundantes con un brillo extraordinario. Una nube multicolor emergió hacia el cielo. La torre de acero que sostenía la bomba fue volatizada. El físico Enrico Fermi escribió: “Mi primera impresión de la explosión fue un intenso flash de luz, y una sensación de calor en las partes de mi cuerpo que fueron expuestas. Aunque no miré directamente hacia el objeto, tuve repentinamente la impresión que el campo era más brillante que en pleno día. Luego, con mis gafas oscuras miré en dirección de la explosión, vi algo que parecía una conglomeración de llamas que se levantaban hacia el cielo muy rápidamente. Después de unos cuantos segundos vi que las llamas levantadas perdían su brillo, y aparecía una enorme columna de humo, como un gigantesco hongo que se esparce rápidamente entre las nubes, probablemente a una altura del orden de unos 30 000 pies (9 000 metros). Después de llegar a su brillo máximo, el humo permaneció estacionario durante un momento antes que el viento comenzara a dispersarlo”. Fermi diría un poco más tarde: “Estimo que los efectos que recibí donde me encontraba corresponden a aquellos producidos por 10 000 toneladas de TNT”.

Mientras que los científicos se dedicaban a una serie de análisis técnicos de la explosión, los militares no salían de su asombro: “los efectos podían muy bien ser llamados sin precedentes, magníficos, hermosos, estupendos y terroríficos. Ningún fenómeno producido por el hombre ha tenido tremenda potencia. Los fenómenos de luz son indescriptibles. Todo el campo fue iluminado con una luz intensa muchas veces superior a la luz del Sol de mediodía. Fue dorada, púrpura, violeta, gris azul. Cada pico y quebrada de las montañas cercanas fueron iluminadas con una claridad y belleza que no pueden ser descritas, que tienen que ser vistas para poder imaginárselas. Segundos después de la explosión vino un sople de aire empujando muy fuerte, un sostenido y pavoroso rugido que anunciaba el fin del mundo que nos hizo sentir que nosotros, seres insignificantes, fuimos blasfemos al desafiar entrometiéndonos con las fuerzas hasta entonces reservadas al Omnipotente”. Oppenheimer, por su lado, dijo haber recordado la frase hindú: “Me convertido en muerte, en destructor de mundos”. Norris Bradbury, que sería el siguiente director del laboratorio Los Alamos, dijo más tarde: “En esos primeros 15 segundos lo visto era tan increíble que los espectadores no salían de su asombro. No creo que en ese momento, nadie se pregunta qué hemos hecho a la civilización. Los sentimientos de conciencia vendrían más tarde”.

Kenneth Rainbridge, director de pruebas, informó que sus reacciones fueron mixtas. “Cuando la bomba partió tuve el sentimiento que tendría cualquier otro temor después de haber trabajado durante meses esta prueba, un sentimiento de regocijo porque la cosa había funcionado. Esto fue seguido por otra rápida reacción, una suerte de alivio al no tener que ir hacia la bomba y averiguar porqué no funcionó”. Pero más tarde, él dijo a Oppenheimer: “ahora todos somos unos hijos de perra”.

En el punto de control, situado a 10 000 yardas (9,144 metros) al sur del área cero, Farrel escribió: “La tensión cayó en el cuarto y todos comenzaron a felicitarse mutuamente. Las tensiones reprimidas fueron liberadas en esos pocos minutos y todos parecían sentir inmediatamente que la explosión excedía las expectativas más optimistas y esperanzas más disparatadas de los científicos.”

El flash de luz de la explosión fue visto en Alburqueque, Santa Fe, Silver City, Gallup y El Paso. Tan intensa fue la luz que una niña ciega conducida en un automóvil cerca de Alburqueque preguntó ¿qué fue eso?.

1.9 Lluvia radiactiva

Cuando regresó el Sol y se crearon corrientes de aire, la radiactividad producida en la explosión fue barrida hacia el valle. Los contadores de radiactividad en el punto S 10 000 (10 000 yardas al sur del área cero) comenzaron a dispararse. Alrededor de las 9:30, los hombres que se encontraban allí fueron llamados al campo de base.

Poco después, los físicos Herbert Anderson y Enrico Fermi se dirigieron al área cero, en un tanque especial, para recoger los restos de la explosión que servirían para obtener información sobre ella. Fermi observó “una área de 400 yardas (360 metros) de radio hundida, vitrificada con una sustancia verde donde la arena se había fundido y nuevamente solidificado.”

Mientras tanto, el general Groves, quién había planeado esperar en el campo de base hasta que pase el peligro de la lluvia radiactiva, comenzó a discutir sobre la siguiente tarea: el bombardeo atómico de Japón.

1.10 La puntería atómica hacia Japón

El Gral. Groves escribió más tarde: “Los planes fueron absolutamente impracticables, ninguno de los que habían presenciado la prueba tenía en la mente discutir de nada. El éxito fue simplemente demasiado grande”. “No solamente habíamos logrado éxito con la bomba sino que todos -científicos, militares e ingenieros- habíamos sido parcipantes personales y testigos oculares del hito mayor de la historia del mundo”.

A las 7:30 p.m. el Gral. Groves envía un mensaje a su secretaria en Washington quien escribe el siguiente mensaje al secretario de Guerra, en Postdam “Operado esta mañana. Diagnóstico aún no completo pero resultados parecen satisfactorios y exceden las expectativas. Liberación de la prensa local necesaria cuando interés alcanza una gran distancia. Dr. Groves contento. Regresa mañana. Me mantendré en mi puesto.”

Cuando se mostraron las mediciones sobre las distintas características de la explosión, se pudo decir con certeza que el éxito era mayor que el esperado. Entonces el Gral. Groves envió otro mensaje a Postdam: “El doctor ha regresado más entusiasta y confiado porque el niño es tan robusto como su hermano mayor. Puedo escuchar sus gritos desde aquí hasta mi granja.”

El mensaje no podía ser más claro. La bomba había funcionado mejor de lo que se esperaba. Su flash se vió hasta 400 km, su estruendo hasta 80 km, y Groves estaba seguro que la bomba de plutonio era tan potente como el arma de uranio. El 6 de agosto de 1945, el pequeño periódico de Santa Fe, que estando a unos cuantos km de Los Alamos había ignorado todo sobre la bomba, publicaba un despacho de la Associated Press, en el que se lee: “La Fuerza Aérea de los Estados Unidos ha soltado sobre los japoneses una bomba atómica conteniendo una potencia mayor que 20 000 toneladas de TNT. Produce 2 000 veces más soplo que la bomba más potente conocida hasta ahora”. Se había bombardeado la ciudad de Hiroshima con una bomba de uranio.

El presidente de los Estados Unidos declaró: “Es una bomba atómica. El dominio de la potencia básica del universo. La fuerza de la cual el Sol obtiene su potencia ha sido liberada contra los que trajeron la guerra en el Lejano Oriente”. Harry Truman añadió: “Hemos gastado 2 000 millones de dólares en el riesgo científico más grande de la historia y hemos ganado”. “En Postdam se trató de perdonar a los japoneses y sus líderes lo rechazaron”.

“la bomba atómica fue la respuesta a ese rechazo. Ellos verán llover la ruina del aire, lo que nunca ha sido visto en el mundo”.

El 9 de agosto de 1945 la Fuerza Aérea de los Estados Unidos dejó caer una bomba de plutonio sobre la ciudad de Nagasaki. Cien mil muertes en forma inmediata causaron las bombas de Hiroshima y Nagasaki. El dantesco espectáculo que presentaban esas ciudades superaba lo imaginable en una pesadilla. Edificios volatizados, suelo vitrificado, una repetición de lo visto en “La Jornada del Muerto” -pero con seres humanos- en el “area cero”.

Las personas que se encontraban en la periferie de las ciudades bombardeadas tuvieron igual o peor suerte. Muchos de ellos murieron más tarde de cáncer inducido por la radiación de la bomba. Otros tuvieron descendientes con problemas causados por la irradiación que sufrieron. Se ha estudiado los efectos de la radiación nuclear a partir de las explosiones de Hiroshima y Nagasaki.

1.11 Crisis de conciencia

Dos meses después de las explosiones atómicas en Hiroshima y Nagasaki, Robert Oppenheimer renuncia a su puesto. En 1947 llegó a ser director del Instituto de Estudios Avanzados de la Universidad de Princeton. Entre 1947 y 1952 se desempeñó como presidente del Comité Consultivo de Energía Atómica (ACE) que en 1947 se opuso al desarrollo de la bomba de hidrógeno (bomba H, basada en la fusión nuclear, más poderosa que la bomba atómica).

El 21 de diciembre de 1953, en un informe militar, Oppenheimer fue acusado de haber estado relacionado con comunistas en el pasado, demorándose en dar los nombres de los agentes soviéticos y de oponerse a la construcción de la bomba de hidrógeno. Fue separado de la Comisión de Energía Atómica. La Federación de Científicos Americanos salió inmediatamente en su defensa. Oppenheimer se convirtió en modelo de un científico con principios.

Mientras trataba de resolver los problemas morales producidos por su descubrimiento científico -usada para fines de destrucción masiva de seres humanos- fue víctima de la caza de brujas que se realizaba en plena guerra fría. Robert Oppenheimer dedicó luego su vida a escribir sobre la relación entre la ciencia y la sociedad. El 18 de febrero de 1967 murió de cáncer a la garganta.

Albert Einstein y Leo Szilard, quienes habían escrito la carta a Roosevelt, convenciéndole para construir la bomba, al ver la destrucción de Hiroshima

y Nagasaki, junto a otros, piden a Harry Truman que renuncie a la bomba. Sin embargo, el gobierno de los Estados Unidos estaba decidido a construir la mayor cantidad posible de bombas atómicas. El poder que conlleva era muy seductor para un país que entraba a esta etapa de historia como el país más poderoso de la Tierra.

Es difícil imaginar el proceso que se generó en las mentes de esos brillantes científicos enfrentados al deseo de sus gobiernos y su propia conciencia.

Otro de los ejemplos históricos sobre la relación entre los científicos y el Estado, es encontrado en Frederic Joliot. Joliot, como Oppenheimer, tomó posición en favor de la República durante la Guerra Civil Española. Se unió al Partido Socialista Francés en 1934 y al Comité de Vigilancia de Intelectuales Antifascistas en 1935. Durante la ocupación de Francia por los nazis, se mantuvo políticamente activo. En junio de 1941 tomó parte en la fundación del Comité del Frente Nacional del que fue presidente. En la primavera de 1942, Joliot se inscribe en el Partido Comunista Francés, que tuvo un rol preponderante en la resistencia contra el nazismo. Su laboratorio, en el que había organizado la producción de explosivos, sirvió de arsenal durante la batalla de liberación de París. En reconocimiento de su labor patriótica fue nombrado comandante de la Legión de Honor y condecorado con la Cruz de Guerra.

En 1945, Charles De Gaulle autoriza a Joliot para crear la Comisión de Energía Atómica (CEA), con el objetivo de realizar, en Francia, las aplicaciones de los descubrimientos de 1939. Joliot es nombrado director del CEA.

Frederic Joliot participó como fundador del Movimiento Mundial para la Paz, y lanzó el “Llamado de Estocolmo” contra los armamentos nucleares en 1950. Ese año fue separado de su cargo de director del CEA, en plena guerra fría, por haber manifestado su negativa para la construcción de la bomba atómica.

Robert Oppenheimer y Frederic Joliot representan en la historia de la ciencia, los ejemplos más notorios de los científicos que participaron en los descubrimientos de los fenómenos que dieron lugar a la bomba atómica y que luego sufrieran conflictos internos por ello.

Chapter 2

Carrera Armamentista Nuclear

2.1 El inicio de la carrera

La carrera armamentista nuclear comenzó en 1941, cuando los físicos alemanes Rudolph Peirls y Otto Frisch y los ingleses James Chadwick, John Cockcroft y Marcus Oliphant recibieron el apoyo de Gobierno británico para construir la bomba. Dicho apoyo convenció a Roosevelt para hacer lo propio en los Estados Unidos. En el verano de 1942, los norteamericanos compran toda la producción de uranio hasta fines de 1945, de la firma canadiense Gold Mine, privando de uranio a los británicos.

Aún cuando en 1943 los Estados Unidos y Gran Bretaña firmaron un acuerdo de colaboración en las investigaciones nucleares, sus trabajos conjuntos estaban empañados de desconfianza. Los franceses fueron científicamente aislados del dominio nuclear por los dos países. Winston Churchill, en contra de sus consejeros, mantendría a Frederic Joliot fuera de todo secreto.

En cuanto a la Unión Soviética, aliado en la guerra contra el nazismo, no fue informada sobre la existencia de la bomba, a pesar del pedido del físico Niels Bohr que temía la perspectiva de una carrera nuclear. Aunque Roosevelt había sido convencido por Bohr, Churchill logró cambiarlo de opinión en setiembre de 1944. ¿La razón? difícil saberlo, pero Churchill reconoce que antes de finalizar la guerra, él pensaba rearmar a los alemanes

para cerrar el camino a los soviéticos hacia Europa Occidental?¹.

José Stalin sería puesto al corriente de la existencia de la bomba en julio de 1945 (cuando ya había sido probada) durante la conferencia de Postdam.

La Unión Soviética detonó su bomba nuclear en 1949. Los norteamericanos hacen explotar la primera bomba de hidrógeno en noviembre de 1952, los soviéticos hacen explotar la suya en agosto de 1953. Así se establecía el equilibrio del terror.

Los británicos prueban con éxito su bomba atómica en octubre de 1952, en Montebello (Australia) y los franceses lo hacen en febrero de 1960 en Reagan (Sahara).

La bomba atómica deja de ser un secreto de las dos superpotencias. Ese esfuerzo por impedir que otros países construyeran bombas había fracasado. Esta constatación y el hecho que la tecnología nuclear tiene una gran importancia comercial para los países que la dominan, indujeron, en agosto de 1954, a Dwight Eisenhower a que levante el embargo sobre el intercambio de informaciones en relación a las técnicas nucleares.

En agosto de 1955, en Ginebra, se realiza la primera conferencia sobre los usos pacíficos de la energía nuclear. Allí se encontraron científicos, técnicos y políticos hablando sobre la fisión nuclear y sus aplicaciones. La humanidad tenía en ese momento la oportunidad de iniciar una carrera nuclear dirigida al progreso real, es decir, aquel que significa construcción y mejoramiento de la vida. Pero también, los que acariciaban la idea de construir su propia bomba, probablemente estaban atentos a las conferencias de los científicos que descubrirían al mundo sus secretos. En 1957 se crea el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Este organismo especializado de las Naciones Unidas fue creado para incentivar las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear e impedir el empleo de las técnicas nucleares para fines militares.

El 16 de octubre de 1964, China Popular detona su bomba atómica. El 1° de junio de 1967 explota su primera bomba H, generando cierto temor entre las potencias nucleares, pero sobre todo en India, su vecina.

Cuando el 2 de julio de 1968, las superpotencias firman el Tratado de no Proliferación Nuclear (TNP), Indira Gandhi rechaza hacerlo porque “dicho tratado preserva el monopolio atómico de las superpotencias y relega a los otros países a un *status* de segundo plano. El 18 de mayo de 1974, India

¹Le Monde, 26 de noviembre de 1954.

ingresa al exclusivo Club Nuclear, explotando su primera bomba atómica, confirmando así la factibilidad de construir bombas atómicas en países con medianos recursos económicos y científicos.

2.2 Jugando con fuego nuclear

A las 16:40 hrs, ocho bombarderos F16, escoltados por 6 F15, despegaron de la base de Etzion, al este del Sinaí, en el fondo del Golfo de Akaba. Tan discretos como veloces entran al territorio saudita -sin ser detectados por los aviones de control Awac que controlan el territorio. Penetran en Iraq y en 50 minutos están apuntando a la cúpula del reactor de investigación Osirak, construido con asistencia francesa. El bombardeo pulverizó el reactor que costó 1 500 millones de dólares. Israel justificaba su operación por el temor que ese reactor se esté preparando para construir la bomba atómica.

Lo arriba descrito ocurrió el 7 de junio de 1981 y fue un momento importante en la competencia nuclear entre Israel y algunos países árabes. El bombardeo del Osirak significó para Sadam Hussein una humillación que hasta ahora debe recordar.

Previsto para funcionar a 70 MW (MW: megavatio, equivale a 1 000 kilovatios), Osirak era una copia del reactor Osiris instalado en Saclay, Francia, cuyo combustible es uranio enriquecido al 93%. Se debía cambiar la carga de 13 kg cada cuatro meses. Justamente es la cantidad necesaria para producir una bomba.

Pero había también la posibilidad de usar uranio natural, a partir del cual -con el reactor Osirak- se fabricaría plutonio, otro combustible para bombas atómicas. El uranio natural se vende libremente. Para ello era necesario separar el plutonio del uranio. En tal sentido, era sintomático que, en 1978, Iraq compre un laboratorio de reprocesamiento de combustible.

Por esas razones, durante la guerra del Golfo Pérsico, se temía la eventualidad del uso de armas nucleares por parte de Iraq.

El OIEA inspeccionaba dos veces al año las instalaciones del Centro de Investigaciones Nucleares de Tuwaitha, declarándosele de conformidad con el TNP, firmado por Iraq en 1969. Este centro contaba con un reactor de investigación IRT-5000, el reactor de investigaciones Tamuz- 2, un pequeño laboratorio para la fabricación de combustible y un lugar de almacenamiento.

La sospecha de que algo raro sucedía en Tuwaitha surgía del hecho de que esas instalaciones ocupaban sólo la cuarta parte del emplazamiento y de

múltiples otros indicios que el OIEA consideraba especulaciones.

Después de la guerra que perdió Iraq, el OIEA se propuso probar la existencia de un supuesto programa de enriquecimiento del uranio mediante el sistema de centrifugación. Uno de los objetivos era controlar el combustible de uranio muy enriquecido, necesario para la bomba atómica.

El primer equipo de inspección OIEA, que nació en un ambiente de natural tensión por la inseguridad sobre el recibimiento por parte de Iraq, partió de Viena el 13 de mayo de 1991. Cuando llegó a Tuwaitha, el equipo encontró el Centro totalmente destruido. Se descubrió que material de uranio enriquecido había sido enterrado fuera del Centro en pleno bombardeo.

Se encontraron indicios de actividades no declaradas. Se inspeccionó también Tarmiya, otro emplazamiento sospechoso, que mostraba igualmente procesos no declarados. En la primera misión no pudo establecerse actividades clandestinas. Luego cayó una avalancha de informaciones de inteligencia. Entre éstas se tuvo las del desenterramiento y traslado de objetos en forma de discos. Además se supo de un programa de enriquecimiento mediante el método de separación electromagnética. Expertos que trabajaron para el proyecto Manhattan mostraron evidencias del camino hacia la bomba en Iraq.

Una persecución digna de las películas de James Bond permitió alcanzar un convoy que se escapaba con los discos y se consiguieron las pruebas de la construcción clandestina de un programa nuclear tendiente a la bomba atómica. Allí comenzó el programa de inspecciones y forcejeo diplomático que completaron las informaciones sobre las intenciones nucleares de Iraq.

2.3 Los tigres del Asia

Según informes especiales del OIEA, China ha proporcionado tecnología nuclear militar a Paquistán, casi hasta la construcción de una bomba atómica. Este país ha tenido que reconocer que puede construir una bomba. Por otro lado, hace años se sospecha que Corea del Norte, aliado de China, es capaz de construir una bomba atómica.

Más aún, el desmembramiento de la URSS y las dificultades de traslado de armas atómicas de las repúblicas a Rusia ofrece dificultades, agravando los riesgos de proliferación.

Para completar el panorama, China, Paquistán e India se mantienen al margen de las salvaguardias totales, dejando al OIEA sin posibilidades de

inspeccionarlos.

En ese ambiente, los asiáticos expertos en energía nuclear se quejan, como lo hacen en países del Tercer Mundo, de la tremenda injusticia científico y tecnológica que significa el TNP y su aplicación. Mientras que se desea controlar a los países tercermundistas, las dos potencias nucleares, los Estados Unidos y Rusia no hacen esfuerzos serios por el desarme nuclear y la prohibición de ensayos nucleares.

Por otro lado, se afirma que los países occidentales apoyaron programas nucleares que dieron lugar a los problemas de proliferación. En ese sentido, todos los expertos consideran a Israel como un país poseedor de armas nucleares sin que ello signifique preocupación alguna en los Estados Unidos, influyente miembro de las Naciones Unidas.

Justificación o pretexto, es cierto que los países que no se adhieren al TNP aluden la asimetría en este tratado. Lo cierto es que los países con potencialidades tecnológicas para construir la bomba no lo firman. Corea del Norte, que usó el TNP para lograr asistencia técnica del OIEA, con la tecnología adquirida se despide del TNP, dando a entender su autosuficiencia. Así, el TNP aparece como el paso obligado para los países deseosos de entrar el Club Nuclear en el mediano plazo.

Cabe resaltar que el desarrollo nuclear de India y China responden a estrategias establecidas hace unos cuarenta años y que su tecnología la aplican en un espectro de problemas que van desde la medicina nuclear hasta la generación de nucleoelectricidad. El dominio de la tecnología nuclear con fines pacíficos lleva casi en forma natural hacia las aplicaciones militares. Allí se encuentra el origen de todas las ambigüedades que es característica de todas las ciencias, incluyendo a la biología, la que puede servir para desencadenar una guerra biológica de consecuencias impredecibles.

A principios de 1993, Corea del Norte amenazó con guerra nuclear si se le impone inspecciones nucleares por parte del OIEA de dos plantas nucleares, en busca de posible desarrollo de bombas atómicas. Esto nos hace recordar lo ocurrido en Iraq, que desarrolló en forma clandestina un complejo proceso hacia la bomba nuclear.

2.4 Carrera nuclear en América Latina

2.4.1 Argentina

En 1950, Argentina da los primeros pasos para la creación de la Comisión de Energía Atómica (CNEA), institución que conduce todas las actividades relacionadas con el campo nuclear. Entre 1950 y 1958 se lleva a cabo una intensa capacitación de personal, iniciándose una formación permanente de físicos a través de la creación del Instituto de Física de Balseiro.

Entre 1958 y 1967, se construye un reactor nuclear de investigación de 5 MW fabricándose inclusive los elementos combustibles para dicho reactor.

En 1974 entra en operación la central de Atucha (CNA I), que fue adquirida llave en mano de la empresa alemana Siemens. El reactor CNA I, como los siguientes, es de uranio natural, permitiendo a la Argentina tener independencia respecto a los países desarrollados productores de uranio enriquecido. En 1983, Argentina puso en operación su segundo reactor de potencia Embalse, de 649 MW. Este reactor fue construido por la empresa canadiense *Atomic Energy of Canada Limited*. Para su construcción hubo una amplia participación de técnicos argentinos, quienes obtuvieron valiosa experiencia.

La experiencia de los técnicos argentinos permitió que su país inicie la construcción de su tercera central nuclear Atucha II, cuya potencia sería de 700 MW.

Entre los logros argentinos se cuenta además los siguientes: construcción de elementos de combustible; producción de agua pesada necesaria para los reactores y la construcción de un reactor de investigaciones de 10 MW para el Perú. En lo que respecta a recursos humanos, Argentina, en 1984, contaba con aproximadamente 7 000 empleados en la CNEA; esto a pesar del éxodo de profesionales, quienes, en algunos casos, ocupan puestos de importancia en otros países.

En noviembre de 1984 Argentina dió a conocer la construcción de una planta piloto de enriquecimiento de uranio 235 a 20%, en Río Grande, iniciada en 1978. Este uranio enriquecido es necesario como combustible de reactores de investigación, como el que Argentina construyó en Perú, para el cual se usó combustible proveniente de Alemania.

Debe resaltarse la gran participación de las empresas argentinas en la construcción del reactor de Embalse. Los elementos más significativos construidos para Embalse fueron bombas de refrigeración de parada, la plata-

forma portante de los mecanismos de control del reactor, las esclusas de aire, la grúa de 380 toneladas para la sala de máquinas, etc. Se estima que para la construcción de la central Atucha II, la participación será mucho más importante.

Cabe mencionar que Argentina se ha convertido en productor de cobalto 60, que es una fuente de irradiación con múltiples aplicaciones pacíficas.

2.4.2 Brasil

En 1951, Brasil crea el Consejo Nacional de Investigación, dando comienzo a un desarrollo científico y tecnológico en forma más o menos planificada. En 1953 se crea el Instituto de Investigaciones Radiactivas, iniciando de esa forma trabajos nucleares. En 1956, un año después de la Conferencia sobre la Energía Nuclear con Fines Pacíficos, arriba mencionada, Brasil crea la Comisión de Energía Nuclear (CENEN) y el Instituto de Energía Atómica (IEA).

En 1974, Brasil creó la empresa Nuclebras, con el objetivo de construir centrales nucleares y dominar la tecnología del ciclo de combustible. En enero de 1985 fue puesta en servicio la central nuclear Angra I, en el Estado de Río de Janeiro. La central tiene una potencia de 626 MW y está integrada al sistema sureste que totaliza 24 739 MW en 1983. La central Angra I fue comprada por Brasil llave en mano de la empresa Westinghouse. En 1975, el Gobierno brasilero firmó con el gobierno de Alemania Federal, un acuerdo de cooperación nuclear que debía concluir cuando Brasil domine la tecnología del ciclo de combustible nuclear y se construyera 8 centrales de 1 300 MW cada una. Este acuerdo preveía, entonces, un amplio programa de transferencia de tecnología.

2.5 Perspectivas y temores nucleares en América Latina

En nuestro continente, Argentina, Brasil y Chile no han firmado el TNP. Estos países son los que precisamente tienen un mayor grado de desarrollo nuclear en la región.

El director ejecutivo de la Comisión Chilena de Energía Atómica (C.Ch.-E.N.), Dr. Francisco Brieva, declaró que Chile no firmó el tratado “porque

esas son decisiones esencialmente geopolíticas”².

En el Primer Taller sobre Reactores Nucleares de Investigación³ se vio con claridad que el impulso nuclear en la región no respondió a planes coherentes de desarrollo, sino que fue inducido por una competencia nuclear instintiva.

Actualmente, tanto Argentina como Brasil cuentan con la tecnología para construir bombas atómicas. Chile va en camino.

En Chile, el 13 de octubre de 1974, entró en funcionamiento un reactor de 5 MW, produciéndose y controlándose una reacción de fisión en cadena. El 4 de febrero de 1977, Chile puso en funcionamiento un segundo reactor nuclear. El 24 de octubre, el Gral. Augusto Pinochet inaugura el Centro Nuclear “Lo Aguirre”, dirigido por el Ejército.

En 1980, en el Centro Nuclear “Lo Aguirre” se montaron plantas experimentales de concentración de uranio, como parte de un programa de autosuficiencia en la utilización de la fisión nuclear. El 30 de diciembre de ese año entró en operación una planta experimental de purificación de uranio.

Chile apunta al combustible nuclear necesario para los reactores o para la bomba atómica. Aún cuando este país tiene reactores que no son usados en su plena capacidad para aplicaciones pacíficas, se están dirigiendo hacia la tecnología crítica. En 1985, el Brigadier J. Mir Dupoy, director ejecutivo de la C.Ch.E.N., declaraba que se procederá a una intensificación de la investigación y desarrollo a nivel experimental de tecnologías del ciclo de combustible nuclear para dar respuesta, con una factibilidad técnico-económica, a la alternativa energética nuclear.

El director ejecutivo de la C.Ch.E.N. en 1990, Dr. Francisco Brieva, afirmaba que no se tiene un alto nivel de desarrollo en el ciclo de combustible nuclear, que tiende a “poder generar localmente la capacidad de producir uranio enriquecido con propósito no bélico”. La verdad es que el dominio del ciclo de combustible nuclear lleva tanto a las aplicaciones pacíficas como a las bélicas.

²Revista *CRECES 90*, Santiago, agosto 1990.

³Primer Taller sobre Reactores Nucleares de Investigación en América Latina, 21 - 25 de enero de 1991, en Santiago de Chile

Chapter 3

La Energía Nuclear en el Perú

3.1 La organización

Las actividades de investigación y desarrollo nuclear en el Perú se realizan básicamente en torno a las facilidades del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), para lo que se ha organizado en tres direcciones generales: la Dirección General de Promoción y Desarrollo Tecnológico (DGPDT), la Dirección General de Instalaciones (DGI) y la Dirección General de Protección Radiológica (DGSR).

La DGPDT cuenta con la Dirección de Ciencias, dedicada a la física, ciencia de materiales, química; la Dirección de Aplicaciones, dedicada a las aplicaciones industriales, hidrológicas, agrícolas, médicas, entre otras; y la Dirección de Capacitación.

Para realizar tales actividades de desarrollo, se debe contar con instalaciones en buen estado de funcionamiento, lo que es asegurada por la DGI, la que tiene la responsabilidad de la operación y mantenimiento del reactor de investigaciones de 10 MW (RP-10) y de la planta de producción de radioisótopos (PPR).

La DGSR desarrolla trabajos de protección radiológica para asegurar que las aplicaciones no conlleven riesgos innecesarios.

Para las aplicaciones nucleares, el IPEN cuenta con cuatro centros de investigación y desarrollo. Estos son el Centro de San Borja o sede central,

el Centro Nuclear Oscar Miroquesada de la Guerra (C.N. "RACSO") de Huarangal, el Centro de Medicina Nuclear (CMN) y, ahora, la Planta de Irradiación Multiuso (PIMU), la que se encuentra en construcción.

3.2 Centro de Estudios Nucleares de San Borja

El Centro de Estudios Nucleares de San Borja cuenta con varias facilidades experimentales que son usadas para la investigación, el desarrollo y la capacitación. Entre estas podemos mencionar el reactor RP-0 y el generador de neutrones.

El reactor RP-0 sirve para entrenamiento donde se realizó la capacitación del personal que ahora tiene a su cargo el reactor RP-10 de Huarangal. En el reactor RP-0 se puede realizar actividades de investigación en física nuclear, física de reactores, ciencia de materiales, química nuclear, etc.

Otra facilidad de envergadura del Centro de San Borja es el generador de neutrones. Este generador está compuesto por un acelerador de deuterones (D) de 150 kiloelectronvoltios (keV), los que al chocar con un blanco de tritio genera núcleos de helio (He) y neutrones (n) de 14 megaelectronvoltios (MeV) de energía en todas direcciones. Estos neutrones se usan para realizar experimentos con la materia, y para análisis por activación neutrónica de elementos livianos.

En San Borja también se cuenta con un irradiador gamma de 6000 curies para experimentar con la conservación de alimentos y la esterilización de materiales médicos descartables o termosensibles. Aquí se han establecido los protocolos de irradiación que se usarán en la futura PIMU. Además, se tiene un laboratorio para realizar gran parte de los análisis fisico-químicos y microbiológicos para el control de calidad. Entre los equipos se cuenta con un espectrofotómetro visible e infrarrojo, potenciómetros, balanzas analíticas de precisión, equipamiento para determinación rápida de humedad, estufas, incubadoras, autoclave, etc.

También se cuenta con laboratorios de fluorescencia de rayos X, adecuado para el análisis de muestras ambientales el laboratorio de absorción atómica.

Asimismo se tiene facilidades de radiografía X, tintas penetrantes y corrientes inducidas para los ensayos no destructivos (END). Por otro lado se dispone del laboratorio de radiotrazadores y de hidrología isotópica.

En San Borja se encuentra el Centro Superior de Estudios Nucleares (CSEN), dedicado a la capacitación de personal en temas nucleares. Ello se

realiza a través de prácticas, tesis, cursos y programas de maestrías que se llevan a cabo en coordinación con universidades.

Finalmente, en San Borja está el Centro de Información y Documentación (CID), que tiene una amplia bibliografía nuclear, y científica en general, gracias a las fuentes de información más grandes del mundo, entre las que están el OIEA. Hay aproximadamente unos 20 000 volúmenes en microformas e impresos con una hemeroteca (revistas especializados). Se trabaja con una propia base de datos y las que produce el sistema internacional nuclear (INIS). Esta última está en el sistema CD-ROM, que alberga más de un 1 600 000 trabajos de todo el mundo. Esta base tiene un crecimiento anual de 100 000 trabajos.

El CID dispone de sistema de correo electrónico a través del cual se realiza búsquedas en grandes bases de datos del mundo.

3.3 Centro Medicina Nuclear (CMN)

Las actividades en medicina nuclear se iniciaron en 1975, con la creación de la Unidad de Medicina Nuclear, en estrecha relación con el Sector Salud. El proyecto fue incluido en el Plan Nuclear de 1977. En esa fecha se solicitó la asistencia técnica del OIEA.

El equipamiento en medicina nuclear llegó entre los años 76 y 85, con los programas de asistencia del PNUD (90%) y OIEA (10%). Asimismo, se proporcionó equipos a centros de Arequipa y Trujillo.

En 1978 se estableció el Centro de Medicina Nuclear (CMN) en convenio con el Hospital Loayza. En 1980 se firmó un convenio definitivo con el Sector Salud y el Instituto de Enfermedades Neoplásicas (INEN). El Ministerio de Salud cede 1100 m² en el área de INEN para construir la sede definitiva del CMN. El local empezó a funcionar en 1983.

Los recursos generados fueron unos 60 000 dólares al año, pero que eran administrados por el IPEN. Con la administración del IPEN, la gammagrafía de hueso costaba 20 dólares y las otras 10. En 1993, con el INEN, cuestan el doble, que son los precios reales.

En setiembre de 1991 el IPEN y el INEN suscriben un nuevo acuerdo mediante el cual el IPEN cede temporalmente el CMN al INEN para su administración y control operativo con miras a su mejor funcionamiento. En este nuevo *status*, el CMN opera como un departamento del INEN, y por ende del Sector Salud. La consecuencia inmediata observada es la mejoría de

las relaciones con el sector médico y la administración es más fluida. Cabe señalar que los ingresos son manejados por el INEN y los materiales son adquiridos en los plazos convenientes.

Todas estas acciones están dirigidas a recuperar la actividad asistencial del INEN, que servirá de base para las labores de investigación, docencia, capacitación y promoción. Personal del IPEN debe participar en programas de investigación en los laboratorios del INEN.

Las relaciones con el INEN han significado mayor eficiencia. Más aún, el radioinmunoanálisis (RIA), que no contaba con insumos, ha retomado su ritmo ascendente de actividades.

Cabe notar que el equipamiento tiene unos 13 años, lo que es largamente obsoleto en términos del mercado. Ello ha producido pérdida de demanda algunos procedimientos como la gammagrafía de cerebro, la que ha sido reemplazada por la tomografía axial computarizada (lo tiene INEN, los hospitales militares, IPSS, y particulares).

Se espera que el CMN financie sus gastos operativos. Sin embargo, se seguirá necesitando apoyo externo para la adquisición de nuevas tecnologías.

El CMN cuenta con dos cámaras gamma General Electric modelo 400 A para estudios gammagráficos de pacientes. Asimismo se cuenta con laboratorios de RIA.

3.4 Centro Nuclear “RACSO” de Huarangal

El Centro Nuclear Oscar Miró Quesada de la Guerra “RACSO” (C.N. “RACSO”) de Huarangal es la mayor infraestructura científica con la que cuenta el país, donde puede llevarse a cabo investigaciones en todas las disciplinas de las ciencias y la ingeniería.

El área del centro nuclear es apta para la ubicación de una ciudadela científica y tecnológica, donde se instalen laboratorios interdisciplinarios. Cuenta con energía eléctrica, agua y comunicaciones telefónicas adecuadas.

Desde Lima, para llegar a Huarangal debemos pasar por Puente Piedra (30 km al norte de Lima) y luego tomar el desvío de 12 km al Este, exclusivo para el centro nuclear. Desde Puente Piedra se atraviesa por atractivas plantaciones situadas al borde norte del valle del Chillón. A unos 8 km del desvío, al alejarse un tanto del valle, comenzando una pendiente bien pronunciada, se terminan las plantaciones con un centro lechero y se penetra en un sinuoso camino entre cerros, que impiden ver el valle del Chillón. Al

final de esta subida, se tiene un tramo casi horizontal que nos permite salir del laberinto para llegar con una repentina vista al C.N. "RACSO".

El C.N. "RACSO" está localizado en unas 125 hectáreas de Huarangal, entre montañas, haciendo una especie de platea con una hermosa vista hacia el valle del río Chillón habitado por unas 300 personas. El río Chillón se encuentra a unos 2 km del centro nuclear. Huarangal presta el nombre del pueblo de unos 200 habitantes situado a 1,5 km hacia el noreste del centro nuclear.

El C.N. "RACSO" cuenta con agua que viene de pozos de 55 metros de profundidad y almacenada en un reservorio de una altura de 80m y de 5 000 metros cúbicos de capacidad. El agua del reservorio alimenta un tanque intermediario que suministra agua tratada para el reactor, por un lado, y agua potable por otro.

La energía eléctrica es llevada al C.N. "RACSO" por una línea exclusiva de 14 km desde la subestación del Zapallal. La línea tiene una tensión de 60 kilovoltios, con una capacidad de 20 MW. En el centro se tiene una subestación que transforma la tensión a 10 kilovoltios y una potencia de 7 MW.

Las comunicaciones al "RACSO" son por vía telefónica, para la que se cuenta con 3 líneas directas y una central con capacidad para 160 anexos.

3.5 El reactor de investigaciones RP-10

La parte principal del "RACSO" es el reactor de investigaciones de 10 MW, RP-10. El reactor está rodeado por un cilindro de concreto de 27 metros de diámetro y 32 metros de altura. El bloque del reactor es cilíndrico, con 9 metros de radio de agua y un blindaje de 2 metros de concreto pesado en la dirección radial. Tiene la forma de una piscina cilíndrica con una profundidad de 11 metros, en cuyo fondo se encuentra el núcleo del reactor.

Este reactor tiene un núcleo de uranio enriquecido al 20 % de uranio 235, en 25 elementos combustible (El uranio natural está compuesto por 99,3% de uranio 238 y 0,7% de uranio 235).

El núcleo de uranio 235 absorbe un neutrón y se fisiona en dos fragmentos, cada uno de los cuales emite alrededor de 2 o 3 neutrones, que a su vez serán absorbidos por núcleos de uranio 235, los que asimismo fisionarán en dos fragmentos, etc., produciéndose la llamada reacción en cadena. Para

controlar esta reacción en cadena, en función de los requerimientos, se usa barras de control absorbentes de neutrones, en base a cadmio, plata e indio.

Para lograr un mayor número posible de neutrones en el núcleo del reactor, se tiene reflectores de neutrones, elaborados en base a grafito y berilio.

El núcleo del reactor es refrigerado por un flujo de agua. El agua sirve también como moderador de neutrones, es decir que disminuye la velocidad de los neutrones de fisión.

El reactor se controla desde una sala a la que llegan los diversos parámetros de funcionamiento. Para ello se cuenta con instrumentos de medición y control en diversas posiciones del reactor.

Los instrumentos neutrónicos, que comportan detectores de neutrones, entregan datos sobre la producción neutrónica y la seguridad tanto del personal como de la instalación. Se tiene sistemas seguridad para señalar situaciones de riesgo y responder automáticamente con acciones de seguridad. Estas acciones son: alarma, reducción de potencia, inserción automática de barras o parada del reactor.

Se cuenta también con instrumentos no nucleares de medición, que proporcionan medidas de temperatura, presión, caudales y niveles de agua en diversos lugares de la instalación. Estos parámetros son controlados automáticamente y en caso de anomalía se pone en funcionamiento sistemas de alarma y seguridad para proteger la instalación.

En el recinto del reactor se tiene una celda caliente que recibe muestras irradiadas que deben ser luego desplazadas al nivel cero para llevarlas a la planta de producción de radioisótopos.

3.6 Posiciones de irradiación del RP-10

El reactor de investigación es usado como fuente de neutrones, los que se generan en el núcleo del reactor e invaden su vecindario. Para la utilización del reactor se cuenta con posiciones de irradiación, donde se colocarán las muestras a ser irradiadas tanto para su estudio como para su transformación.

En el núcleo se tiene 9 posiciones de irradiación, que cuando el reactor opera a 10 MW tienen un flujo entre $5 \times 10^{13} \text{n/cm}^2\text{s}$ y $2 \times 10^{14} \text{n/cm}^2\text{s}$. Fuera del núcleo se tiene unas 19 posiciones de irradiación con flujos menores.

Del borde del reactor salen 4 tubos radiales hacia la sala experimental que rodea el bloque blindado. Se tiene también un tubo con dos salidas a

la sala experimental que pasa tangencialmente al núcleo del reactor. Estos tubos son de acero inoxidable y aluminio.

Se tiene una columna de grafito, situada entre el núcleo y el blindaje, la que permite termalizar los neutrones, disminuyendo su velocidad hasta un promedio que admite la temperatura de la columna.

Se tiene también sistemas de tubos neumáticos que permiten irradiar muestras en el reflector del reactor o en la columna térmica. Las muestras son enviadas desde el laboratorio de activación neutrónica o desde la planta de producción de radioisótopos, según se requiera análisis químicos o sustancias activadas para usos médicos e industriales, respectivamente.

Se cuenta con una facilidad de irradiación para neutrografía usando un tubo radial.

3.7 Laboratorios de física aplicada

Entre las aplicaciones del reactor RP-10 se tiene la neutrografía, para la que se ha construido una facilidad especial. Esta consiste de un recinto de irradiación y un laboratorio de revelado. El recinto de irradiación, situado al final de un tubo radial, tiene un sistema mecánico posicionador de objetos y un captador de haz, que impide la salida de radiación a la sala experimental. Rodeando este sistema se ha construido un blindaje compuesto por bloques de concreto de 60 cm de espesor. El colimador cónico ($L/D = 149$) de neutrones parte del borde del núcleo del reactor y llega a la ventana que da hacia el recinto de irradiación. El flujo de neutrones sobre el objeto es aproximadamente $3,5 \times 10^6 \text{ n/cm}^2\text{s}$, a 7 MW del reactor. La tasa de exposición gamma es de 450 R/h. El haz sobre el objeto tiene un diámetro de 21 cm.

Para usar otro tubo radial se está concluyendo la construcción de una facilidad de espectrometría de gammas inmediatos. Para ello se ha colocado un filtro de bismuto a los dos tercios del tubo a partir del borde del núcleo, en la parte del blindaje de concreto. También se ha colocado un colimador neutrón gamma en la parte final del tubo, entregando un haz de 4 cm de diámetro y un flujo de $2,8 \times 10^8 \text{ n/cm}^2\text{s}$ a 7 MW del reactor. La muestra se ubica en un portamuestras dentro de una cámara estanco con gas helio. El sistema de detección está compuesto por un detector de germanio hiper puro de 25% de eficiencia relativa, conectado a una computadora que controla un multicanal.

Se cuenta también con un laboratorio de huellas nucleares, constituido por un sistema de preparación de muestras (pulidoras, cortadoras, etc.), facilidades de grabado químico y microscopios para el conteo de huellas nucleares.

En difracción de neutrones se tiene cristales de germanio y cobre para monocromatizar el haz de neutrones. Los neutrones dispersados en experimentos Laue se detectan con convertidores de centelleo y metálicos.

3.8 Análisis por activación neutrónica (AAN)

Para desarrollar experimentos con neutrones se cuenta con laboratorios especializados en análisis por activación neutrónica (AAN). Los laboratorios de AAN poseen un sistema neumático de transferencia de muestras, lo que permite enviarlas hasta el núcleo del reactor y regresarlas al laboratorio. Se tiene dos espectrómetros gamma de alta resolución, acoplados a una computadora personal. Además se tiene facilidades básicas para preparación de muestras y patrones y un laboratorio de separaciones radioquímicas.

3.9 Planta de producción de radioisótopos (PPR)

La planta de producción de radioisótopos (PPR) tiene capacidad para producir isótopos primarios, compuestos marcados y manipular sustancias radiactivas.

La parte central de la PPR es el corredor caliente que tiene una puerta hacia la sala experimental del reactor por donde se abastece de materiales irradiados.

En ambos lados del corredor se tienen las celdas de producción de radioisótopos, hacia las que son transportados los materiales irradiados en el reactor.

Se tiene capacidad para producir yodo 131, molibdeno 99, fósforo 32, yodo 125, azufre 35, iridio 182, entre otros. Para ello se cuenta con celdas blindadas y con cajas de guantes que permiten la manipulación de sustancias radiactivas sin riesgo para el personal. Actualmente se produce yodo 131 y tecnecio 99m.

La planta de producción de radioisótopos es utilizada para abastecer el mercado nacional, lo que significa sólo el 1% de su capacidad.

Se cuenta con celdas calientes, un tubo neumático caliente, una campana radioquímica y una caja de guantes, los que están diseñados para manipular sin riesgo sustancias radiactivas: tienen aire comprimido, bomba de vacío, agua, fuente de poder estabilizada de 220 voltios y 60 ciclos por segundo y desagüe de agua natural y activa. Se cuenta también con un laboratorio de calibración.

Se tiene celdas libres para producir radioisótopos y una serie de instrumentos científicos que no son usados plenamente, quedando a disposición de investigadores externos.

3.10 Planta de tratamiento de desechos

La planta de producción de radioisótopos y el reactor RP-10 son las fuentes principales de desechos radiactivos. Estos desechos son sólidos y líquidos.

El C.N. "RACSO" de Huarangal cuenta con una planta de tratamiento de desechos, con una área de 15 000 m². Esta planta consiste de una facilidad de compactación sólida, trincheras para desechos radiactivos líquidos, trincheras de desechos radiactivos sólidos, lugares de almacenamiento de fuentes selladas gastadas, desechos biológicos contaminados y una planta de precipitación química.

3.11 Laboratorios de protección radiológica

Para los fines de la protección radiológica se cuenta con laboratorios especializados de radiobiología, control de contaminación interna, control ambiental, dosimetría por termoluminiscencia y dosimetría de películas.

El laboratorio de radiobiología y citogenética cuenta con una sala de cultivos de células, una de microscopía, preparación de materiales y una de esterilización y fotografía. El equipamiento incluye un microscopio con cámara incorporada, una cámara de flujo laminar horizontal, un incubador, entre otros instrumentos.

El laboratorio de contaminación interna cuenta con un sistema de detección de rayos gamma, el que se usa para medir yodo 131 en tiroides para el personal del RP-10 y la PPR.

El laboratorio de control ambiental cuenta con sistemas para detección beta total y gamma.

El laboratorio de dosimetría por termoluminiscencia, usado para la vigilancia radiológica individual, tiene dos sistemas de termoluminiscencia.

La dosimetría de películas se realiza con un densitómetro digital, un tanque de fijado y un marcador automático de películas.

3.12 La planta de irradiación multiuso (PIMU)

Se está finalizando la construcción de la Planta de Irradiación Multiuso (PIMU), instalada en los terrenos adyacentes al Mercado Mayorista de Santa Anita en Lima. Esta planta prestará servicios de irradiación para diversos productos agropecuarios, hidrobiológicos y materiales médicos. La capacidad referencial de la planta es de 5 toneladas/hora de servicio.

Esta planta consiste esencialmente de una obra civil de concreto armado de paredes y techo aproximadamente de 1 metro de espesor, en cuyo interior se encuentra una piscina con agua desionizada que alberga la fuente de cobalto 60, la cual emite los rayos gamma que se emplean para el proceso de irradiación. Inicialmente, la capacidad de cobalto de la planta es de 600 mil curies. Al comienzo se usará una fuente de 100 mil curies de cobalto 60.

El sistema electromecánico se encarga de transportar los productos hacia el interior para su irradiación y para retornarlo de la misma forma, debido a que los rayos atraviesan fácilmente el producto, el envase y el embalaje, para cumplir con su objetivo.

Entre de los productos a ser irradiados están los tubérculos y bulbos como la papa y la cebolla. A Lima llegan de 600 a 800 toneladas por día. Se estima que entre el 20 % y 25 % se pierde por diversos factores, entre los cuales se tiene el transporte, manipulación, almacenamiento. Con la irradiación se evitará las mermas por almacenamiento a la temperatura ambiental.

Una de las ventajas de la tecnología de irradiación es mejorar las características sanitarias de productos deshidratados para consumo interno y principalmente de exportación, eliminando la carga microbiana contaminante en productos como especias y condimentos, verduras deshidratadas, hierbas medicinales y colorantes orgánicos.

Por último se realizará la esterilización de materiales médicos termosensibles.

Chapter 4

Medicina Nuclear

4.1 Radiofármacos

En 1913, G. de Sevesey, en visita en el Instituto del Radio de Viena, imagina con Paneth, el método de los indicadores radiactivos o radiotrazadores. La base del método reside en el hecho que dos isótopos del mismo elemento se comportan de la misma manera en una reacción química o en un proceso biológico.

Una pequeña cantidad de un isótopo radiactivo (radiosótomo) de corto período, puede ser seguida durante su trayectoria, debido a la emisión de radiactividad. De modo que si, a una cantidad de isótopo estable o de largo período, se añade radioisótopos, será posible seguirla a lo largo de los procesos en que se vea implicada.

Usando esta técnica, G. de Hevesey estudia el metabolismo del plomo en las plantas. Para ello utilizó un método de detección suficientemente sensible, con un electroscopio de hojas de oro, como para no requerir grandes cantidades de plomo, e impedir de esa forma riesgos tóxicos.

A. Lacassagne y J.-S Lattes, inventan -en 1924- la autorradiografía. Según este método, una traza de sustancia radiactiva es introducida en un organismo vivo, de modo que se distribuya en las diversas partes de la planta o del animal. Luego se prepara varios cortes para ponerlos sobre placas fotográficas, las que son desarrolladas después de un tiempo de exposición conveniente, estableciéndose la distribución de la sustancia introducida.

Hasta 1934, estos métodos eran necesariamente limitados a elementos pesados, naturalmente radiactivos, entre talio y uranio, poco trascendentes

en los procesos biológicos.

El descubrimiento de la radiactividad artificial, por Frederic e Irene Joliot-Curie, abre amplias perspectivas de aplicación de la radiactividad en biología. En setiembre de 1935, G. de Hevesey utiliza el fósforo 32 - radioisótopo de período de 17 días- para estudiar el metabolismo de la rata. Para ello se suministró algunos miligramos de fosfato de sodio, conteniendo fósforo 32 como trazador. El estudio permite saber que el fósforo tarda aproximadamente dos meses en una rata normal, antes de ser eliminado.

El yodo radiactivo fue utilizado a partir de 1937, para el estudio del metabolismo del yodo en la tiroides y para el tratamiento de enfermedades de esta glándula. Primero se usó el yodo 128, con período de 25 minutos, y luego del yodo 131, con un período de 8 días.

Hoy en día se produce radioisótopos de todos los elementos químicos. Una etapa importante en las aplicaciones de la radiactividad a la biología y a la medicina la representó la síntesis de moléculas marcadas, es decir moléculas en las que un átomo estable es reemplazado por uno de sus isótopos radiactivos.

Las moléculas marcadas tienen las mismas propiedades que las no marcadas, de modo que serán procesadas de la misma forma, pudiendo ser seguidas en su trayectoria. La importancia de este método se basa en la posibilidad de detectar pequeñas cantidades de moléculas marcadas.

Con este método ha sido posible conocer la forma como se construyen moléculas complejas a partir de constituyentes simples. Usando moléculas marcadas se puede probar que el metabolismo de las células está dirigido enteramente en el patrimonio genético, es decir en ácido desoxirribonucleico (ADN).

Las moléculas marcadas han sido utilizadas en el estudio de enzimas, de metabolismos, de mecanismos de regulación y de la acción de medicamentos.

Entre los dominios en los que se aplican las moléculas marcadas también se tiene el código genético, la biosíntesis de proteínas y la ingeniería genética.

Se ha logrado la autorradiografía a escala celular, siguiendo visualmente las macromoléculas portadoras de núcleos radiactivos para determinar su localización en el interior de células vivas.

En 1944, un equipo multidisciplinario constituido por F. Joliot, R. Courrier, A. Horeau y P. Sue produjeron, por primera vez, una hormona marcada, permitiendo identificar los receptores moleculares correspondientes y estudiar los aspectos moleculares de las acciones farmacológicas de varias

sustancias. El RIA ha sido desarrollado muy rápidamente, gracias a las moléculas marcadas. En los laboratorios médicos es hoy una actividad de rutina para los dosajes de hormonas.

El radioinmunoanálisis (RIA) permite determinaciones *in vitro* de ciertas enfermedades con una sensibilidad de 10 a 100 millones de veces mayor que con otros métodos. Con el RIA se determina la presencia de hormonas, vitaminas, enzimas y varias drogas en fluidos biológicos, como por ejemplo la sangre. Ello facilita el estudio de trastornos de la nutrición y de enfermedades microbiológicas.

Con radiofármacos se puede estudiar aspectos farmacocinéticos en todo el cuerpo. También se usa isótopos radiactivos como trazadores para el diagnóstico y la terapia. Por ejemplo, el esqueleto puede ser estudiado por cintigrafía usando compuestos marcados fosforados, marcados con tecnecio 99m, para localizar metástasis óseas de cáncer. También podemos mencionar el despistaje de vascularización del músculo cardíaco por lesión coronaria con ayuda de talio 201 o rubidio 82, entre otros.

Actualmente se utilizan aproximadamente 300 radiofármacos, en su mayoría de carácter orgánico. En estos métodos debe tenerse cuidado de administrar la menor dosis radiactiva posible, usando radioisótopos de baja actividad y corto período. En tal sentido, los radionucleidos como indio 111, galio 67, galio 78, talio 201 y tecnecio 99m, son los más usados por sus bajas actividades.

4.2 Imágenes en medicina

Apenas Wilhelm Roentgen descubrió los rayos X, en 1895, éstos se aplicaron al diagnóstico médico. Ello se debe a que los rayos X pasan fácilmente por tejidos blandos y son fuertemente atenuados por los huesos. Con los rayos X se obtiene, entonces, imágenes del esqueleto humano, las que son valiosas para detectar ruptura de huesos. Las desventajas son las siguientes: no detectan adecuadamente diferencias entre los tejidos blandos, por ejemplo para ver tumores, y sólo dan una imagen bidimensional, lo que no permite evaluar la profundidad a la que se encuentra una anormalidad.

En el siglo XX se ha producido un vertiginoso avance de la física, la que ha llevado consigo innovadoras técnicas de imagenería médica, hoy difundidas en todos los países del mundo, dando lugar a descubrimientos valiosos en medicina.

En los años 50 se comenzó a usar las sustancias radiactivas, las que eran suministradas al paciente, para luego observar el flujo de esa sustancia en los órganos bajo estudio. Ello dio lugar a la llamada medicina nuclear.

El desarrollo de la física nuclear ha permitido perfeccionar la imagenología médica. Las cámaras de rayos gamma y los radioisótopos constituyen en tal sentido un avance trascendental. En el proceso gammagráfico, se introduce un radioisótopo emisor de rayos gamma en un área específica del cuerpo. Se detectan los rayos gamma emitidos por los radioisótopos, lográndose una imagen de esa parte del cuerpo. Una de las primeras y más simples aplicaciones de este método es el análisis de la tiroides. El paciente ingiere oralmente yodo radiactivo -por ejemplo yodo 131 y, mediante un detector colocado en el cuello, se observa cómo aumenta la actividad a medida que el yodo se va concentrando en la tiroides.

El yodo 131 fue usado desde el principio para análisis de la tiroides. Sin embargo, existe un inconveniente: la vida media del yodo 131 es de 8 días, mientras que el análisis de la tiroides es de algunas horas. Ello significa una dosis innecesariamente alta. Además, los rayos beta de alta energía del yodo 131 -que no contribuye al análisis- hace que aumente la dosis que recibe el paciente. Una alternativa es el yodo 132, cuya vida media es de 2,3 h. Recientemente se ha introducido el yodo 123 con una vida media de 13 horas. El yodo 131 y el yodo 132 provienen de reactores nucleares, mientras que el yodo 123 es producido en aceleradores. La función de los riñones también es analizada con yodo 131. Para ello se introduce el yodo 131 por vía venosa en forma de compuestos marcados. La comparación de concentración de yodo en los riñones puede revelar irregularidades. La rápida excreción del yodo 131, después de pasar por los riñones, hace que la dosis que recibe el paciente sea baja.

Actualmente existen muchos fármacos marcados con radioisótopos. Escogiendo un compuesto marcado que tienda a concentrarse en un determinado órgano puede estudiarse las funciones de éste. La distribución espacial del radiofármaco en el órgano da una idea adecuada de su funcionamiento. Para ello, un arreglo de detectores cuidadosamente colimados permite imágenes de buena calidad.

Uno de los radioisótopos más usados es el tecnecio 99m, que proviene por decaimiento del molibdeno 99, producido en reactores nucleares como el reactor RP-10 de Huarangal. El molibdeno 99 es obtenido tanto como producto de fisión en el combustible nuclear, como de la irradiación con

neutrones del molibdeno 98.

El yodo 132 así como el tecnecio 99m pueden ser obtenidos con un generador. El yodo 132 es “ordeñado” del telurio 132 (producto de fisión) mediante solvente del I.

El tecnecio 99m se extrae pasando una solución salina a través de una columna de intercambio iónico que contiene molibdeno 99. Los rayos gamma de baja energía -140 keV, que no es acompañado de rayos beta- permite el uso de colimadores que entregan una buena imagen.

Una de las aplicaciones más difundidas de la imágenes con cámaras gamma es el diagnóstico sobre el cerebro. Ello se debe a que la sangre no permite impurezas en un cerebro normal. Pero si existe enfermedad o un tumor, el tecnecio 99m puede concentrarse en la región afectada.

Dependiendo de la complejidad de la cámara se obtienen imágenes de buena calidad. Con sistemas de colimación y un sistema de adquisición de datos adecuados se logra imágenes dinámicas del funcionamiento del cerebro. Uno de los más grandes avances en imagenería es la tomografía, que es capaz de generar imágenes tridimensionales a partir de imágenes por “rebanadas” con rayos X de un cuerpo. Actualmente se está trabajando con la llamada tomografía axial computarizada (CAT). La disposición geométrica de los numerosos detectores que reciben los rayos X que atraviesan el cuerpo por “rebanadas” requieren un tratamiento computarizado que recomponga una imagen total.

Todo ello implica un dominio de las técnicas modernas de detección de radiación y de procesamiento de información, aspectos diariamente dominados en laboratorios especializados de la física.

En 1972 apareció la llamada tomografía de rayos X computarizada (TC), gracias al trabajo de G. Hounsfield, quien fue distinguido con el premio Nobel de Fisiología y Medicina. El uso de los radioisótopos en la TC permite reconstruir una imagen tridimensional del órgano estudiado, con la técnica llamada tomografía computarizada con emisión de fotón único, más conocido como SPECT.

En los años 80 se produjo un avance espectacular con la tomografía por emisión de positrones, más conocida como PET, la que permitía una sensibilidad mayor que la obtenida por SPECT con un factor de 20. Son estas técnicas las que permiten el estudio del cerebro. Antes, ello sólo era posible mediante técnicas invasivas, que implicaban la contaminación del cuerpo con sustancias radiactivas. En los años 80 se desarrolló también la técnica de la

resonancia magnética nuclear (NMR), la que usa radiación no ionizante, emitida por los átomos de hidrógeno sometidos a un intenso campo magnético y luego a ondas de radiofrecuencias y variaciones de campos magnéticos que permiten obtener la distribución espacial del hidrógeno (agua) en la sección analizada del cuerpo.

Por otro lado, el PET ha ganado importancia por el éxito de los estudios básicos, habiéndose incorporado en exámenes rutinarios en los grandes centros médicos. En el PET los fotomultiplicadores han sido reemplazados por fotodiodos, los cuales incrementan la resolución espacial y disminuyen los tiempos muertos. Estos instrumentos mejoran la calidad de la información en más de diez veces.

La cámara de positrones requiere un ciclotrón vecino para el suministro de radioisótopos. Por ello se han creado pequeños ciclotrones -en el lenguaje hospitalario se llaman *Baby Cyclotron*- y se instalan en la unidad del PET. De estos equipos, existen en la actualidad quinientos en todo el mundo.

4.3 La década del cerebro

Con los recursos tecnológicos actuales, los avances científicos se van acelerando a tal punto que la ciencia ficción se queda corta ante la realidad descubierta. Entre los temas de investigación más apasionantes está el cerebro: por algo el Congreso y Presidente norteamericanos han declarado esta década como “la década del cerebro”.

Con sus 100 mil millones de neuronas y sus tantas extraordinarias características, el cerebro viene a ser “lo más complejo que se haya descubierto en el universo”, según James Watson, co-descubridor del ADN. Las modernas técnicas permiten identificar las zonas activadas eléctrica, magnética y químicamente cuando el cerebro trabaja.

El PET permite, por ejemplo, confirmar que el hipocampo -que se encuentra en las profundidades internas del cerebro- es necesario para recordar eventos y hechos.

El dispositivo superconductor de interferencia cuántica (SQUID) descubre que los sonidos se escuchan en diferentes lugares dependiendo si éstos son bajos o altos.

También se ha encontrado que los rostros humanos y los objetos hechos por el hombre activan diferente lugar del cerebro. Los rostros se registran en la parte derecha especializada en configuraciones espaciales, mientras que la

imagen de una cuchara activa áreas que gobiernan el tacto y el movimiento. Otro descubrimiento es que el aprendizaje de juegos consume mucha energía, y luego el consumo es menor, aún cuando se esté realizando niveles elevados de complejidad. Por otro lado, ahora se sabe que a menor consumo de energía mayor es el cociente intelectual (CI). Ello hace pensar que el CI tiene que ver más con la eficiencia que con el número de neuronas o circuitos puestos en actividad. Se puede decir que la inteligencia sería la capacidad de optimizar las áreas activadas.

Contrario a lo que se pensaba, las zonas para la lectura, la escritura y la rima, que son partes de la lectura, están ubicadas en diferentes lugares del cerebro.

Otro descubrimiento es que cuando alguien grita, su parte auditiva no se activa como en el caso en que otra persona grite. Eso quiere decir que uno no se escucha a sí mismo como escucha a los otros.

Los estudios muestran que el cerebro está compuesto por zonas superespecializadas. Esta especialización va hasta, por ejemplo, procesar en diferentes zonas nombres propios y nombres comunes.

Una idea que nace en nuestro cerebro viene a ser una composición de actividades en diversos lugares del cerebro, algo así como los instrumentos de una orquesta sinfónica se encuentran en diferentes lugares pero que al funcionar al mismo tiempo producen melodías maravillosas. Para concretar una idea existen zonas de convergencia. La perturbación de la comunicaciones entre zonas produce entonces la imposibilidad de juntar las partes existentes en un compuesto que es la creación.

Los trabajos actuales sobre el cerebro, con ayuda de tecnologías de punta, permitirán identificar pensamientos, sentimientos y memoria y verlos combinarse para producir ideas, pasiones, creaciones, o cada una de las manifestaciones del cerebro que comienza a mostrar sus secretos gracias a la física que los descubre en toda su complejidad y todo su esplendor.

4.4 Radioterapia

Los científicos alemanes Walfoff y Giesel fueron los primeros en anunciar, en 1900, que la radiactividad podía tener efectos sobre los seres vivos. Pierre y Marie Curie constatan que poniendo una muestra de radio sobre un brazo, durante varias horas, “se produce una lesión, parecida a una quemadura, que se desarrolla progresivamente y tarda varios meses para curarse”.

Por sugerencia del científico norteamericano A. Graham Bell y de los médicos franceses Danlos y Dominici, se comienza a utilizar estas propiedades para tratar afecciones cutáneas, en particular el cáncer.

Se comenzó así la telerapia, en la que el paciente recibe la radiactividad sin estar en contacto con la fuente. Una de las fuentes más usadas es el cobalto 60, pero también se usan haces electrónicos o neutrónicos.

La madre de Lawrence, víctima de un cáncer inoperable, fue la primera paciente tratada con éxito con haces neutrónicos, en el ciclotrón de Berkeley.

Con la impulsión de Joseph Hamilton y de John Lawrence, los radio-trazadores comenzaron a usarse en Berkeley. Lawrence utilizó por primera el fósforo 32 para el tratamiento de la leucemia.

El cáncer tiroideo es tratado mediante la aplicación por vía oral de yodo 131. El dolor generado por la metástasis óseas de carcinomas prostáticos, mamarios y de otros orígenes; o el tratamiento de feocromocitomas son tratados con metayodo- bencil-guanidina marcado con yodo 131.

Hoy en día se investiga anticuerpos específicos que servirían de vectores para destruir tumores.

La radiación es usada también para esterilizar productos médicos como vestimenta quirúrgica, suturas, catéteres y jeringas. La radiación tiene ventajas sobre otros métodos como el vapor o calor seco que no se aplica en productos de plásticos. Cabe resaltar que la esterilización con productos químicos pueden tener efectos residuales peligrosos para la salud, hecho por el cual es recomendable la esterilización con rayos gamma, los que son eficaces y poco costosos.

La esterilización con rayos gamma se utiliza también en implantaciones de injertos de tejidos biológicos, como hueso, nervios, fascia, dura, recubrimientos de corio amniota para quemaduras.

4.5 Medicina nuclear en el Perú

En 1956, la Sociedad Alemana de Radiología dedicó su congreso a la naciente medicina nuclear. El congreso tenía un ambiente especial, porque Alemania trataba con mucho esfuerzo de recuperarse de la guerra. Los invitados principales eran los homenajeados Premio Nobel, Otto Hahn y Werner Heisenberg. A Otto Hahn se le encargó el discurso de saludo al recién nombrado Ministro de Asuntos Atómicos, Franz Otto Strauss. La Sociedad Alemana de Radiología consideró que ese congreso debería presentar los avances que

se tendrían que hacer en Alemania, pese a las difíciles condiciones después de la guerra.

El médico peruano Herbert Villanueva-Meyer -quien entonces trabajaba en la Universidad de Hamburgo- en la sesión inaugural de dicha conferencia, presentó trabajos sobre aspectos de “terapia con radio-yodo”, participando desde entonces activamente en las aplicaciones de las ciencias nucleares en medicina. Villanueva-Meyer, treintitrés años más tarde haría también una revisión de los avances en medicina nuclear en el Seminario Internacional sobre el Cincuentenario de la Fisión Nuclear realizado en Lima ¹.

Los compuestos para el marcado de huesos, especialmente los marcados con tecnecio 99m (fosfonatos marcados con tecnecio) y la disponibilidad de las cámaras gamma determinaron que se pueda sistematizar procedimientos para el esqueleto y descubrir tempranamente alteraciones del sistema óseo. Debe tenerse en cuenta que para que una lesión sea visible radiográficamente, tiene que existir una descalcificación entre 30 y 50 por ciento. Con la gammagrafía se obtiene imágenes muy precozmente pues basta que haya un incremento en el flujo vascular local o en la síntesis ósea que ocurre apenas hay una agresión inflamatoria, traumáticas. Es decir, con este método se detecta un cambio bioquímico.

Las imágenes digitales y nuevos radiofármacos han hecho posible que la medicina nuclear incurriera con éxito en el estudio de órganos de gran dinámica -como el corazón y el aparato circulatorio. Así es posible seguir a un bolo radiactivo, inyectado en una vena del codo, en su trayecto a través del corazón.

Por ejemplo, se obtienen imágenes que corresponden a la llegada del bolo radiactivo a la vena subclavia; luego el llenado de las cavidades derechas y el paso a los pulmones, apareciendo el retorno del bolo radiactivo de los pulmones al corazón izquierdo, visualizándose el ventrículo izquierdo, el diástole y el sístole.

También se ha desarrollado la ventriculografía que permite calcular importantes parámetros de la hemodinámica cardíaca, como son la fracción de eyección sanguínea en cada contracción, los volúmenes de las cavidades, los tiempos de llenado y los tiempos de vaciado.

Desde hace pocos años se están utilizando los isonitritos, marcados con tecnecio 99m. Con los isonitritos se puede visualizar la perfusión del mio-

¹Seminario Internacional sobre el Cincuentenario del Descubrimiento de la Fisión Nuclear, Lima, 24-28 de abril de 1989, *Revista Peruana de Física*, Vol III, 1989.

cardio y localizar las áreas deficitarias, ya sea en reposo o inducidas por la tensión o ejercicio. Además, durante su primera fase y con técnica adecuada, es posible realizar la ventriculografía que permite calcular estos parámetros. Los isonitrosos reemplazan con ventajas técnicas al talio 201 y permiten realizar simultáneamente las ventriculografías.

Villanueva-Meyer viene usando los isonitrosos en Lima desde hace unos cinco años con resultados excelentes en el diagnóstico de las enfermedades coronarias.

Los exámenes del corazón con radioisótopos se están incrementando grandemente, porque muchas veces evitan pruebas invasivas de alto riesgo.

Toda una tecnología de equipos portátiles se ha desarrollado para solucionar los problemas de la cardiología nuclear. Entre estos podemos mencionar las cámaras gamma portátiles unidas a sistemas de computación que llegan fácilmente a las salas de emergencia o de cuidados intensivos de los centros hospitalarios. Con el marcado de los glóbulos rojos con tecnecio podemos visualizar los espacios vasculares, los *pools* sanguíneos y de esa forma, tener una representación del sistema vascular. Así se puede definir el lugar y el grado de las alteraciones venosas en los miembros.

En algunos casos de hemorragias digestivas, se podrá localizar el lugar del sangrado, donde el cirujano tiene la indicación topográfica del lugar afectado.

Las múltiples posibilidades y ventajas de las imágenes de tomografía de emisión, equipos SPECT, han determinado que éstos se impongan en la práctica médica, siendo los instrumentos importantes en el desarrollo de la rutina del diagnóstico actual en los países adelantados y ahora en el Perú.

Los equipos convencionales de imágenes están siendo desplazados, frente a los excelentes resultados de los equipos SPECT, sobre todo en el examen del corazón y del cerebro.

En el diagnóstico cerebral por imágenes secuenciales que siguen a la inyección de radiofármacos, midiendo su tiempo de llegada y distribución en el cerebro utilizando sistemas planares, podemos tener una idea bastante clara del flujo sanguíneo; y, por el procesamiento de imágenes, se determina el lugar de disminución del flujo sanguíneo causante de alteraciones cerebrales fugaces. Respecto a estos trastornos transitorios -a los que se daba poca importancia, de acuerdo a las últimas estadísticas- sabemos que el 13% de los afectados sufren accidentes mortales antes del año y el 30% sufre accidentes mortales antes de los tres años.

Exámenes con xenón fueron considerados ideales para estudiar el flujo

sanguíneo cerebral, pero para ello se requiere una compleja instrumentación. Son más de treinta detectores y complicados programas de procesamiento de datos. El SPECT y los nuevos radiofármacos como el hexametilpropileno amina (HMP) permiten medir en forma relativamente simple el flujo sanguíneo cerebral. Actualmente es el método de elección para las exploraciones de la perfusión sanguínea cerebral. Por este método se está encontrando las características diferenciales de los distintos tipos de demencias.

Los estudios del metabolismo cerebral se encuentran en pleno desarrollo, y así se tiene que la fluorotiroxina marcada con fluor 18 es activa y selectivamente metabolizada por algunos tumores cerebrales.

Los estudios de cerebro no sólo son fascinantes, porque nos están enseñando aspectos hasta ahora desconocidos, sino que tienen también sentido práctico al localizar el lugar y la falla metabólica causante del trastorno mental o, simplemente, de la conducta extraña del paciente. Por ejemplo, en la esquizofrenia, los receptores dopaminicos son los causantes, y su actividad puede ser visualizada mediante fluor 18 espirona, que se acumula selectivamente en los núcleos caudados del cerebro y es posible visualizar también cómo éstos son neutralizados por la acción de alguna droga.

Gracias a los radioisótopos estamos empezando a conocer la actividad bioquímica del cerebro y de otros órganos, lo que es muy útil tanto en salud como en enfermedad. Se vislumbra que el diagnóstico tumoral podrá hacerse selectivamente con los anticuerpos monoclonales, marcados con indio 111 que detectan las metástasis de cáncer en el colon y el hígado. Estos procedimientos son una esperanza en la clasificación del cáncer y están creando una nueva especialidad: la radioinmunogammagrafía. Este equipo terapéutico que tiene anticuerpos cargados de energía radiactiva, podrían selectivamente cumplir tareas destructivas como desde hace tres décadas se hace con la tiroides y algunos tumores.

El tumor de la glándula mamaria, pensamos que es uno de los campos prometedores de la medicina nuclear en un futuro próximo. Según Wagner, profesor en la Universidad de Baltimore, en la década del noventa, los isótopos que dominarán el campo de la medicina nuclear serán el carbono 11, el fluor 18, el yodo 123 y el tecnecio 99m.

La medicina nuclear en su desarrollo en el país ha sufrido la misma suerte que otras actividades que requieren la adecuación suficiente y permanente soporte económico. En el aspecto humano las limitaciones son grandes, ya que el moderno y efectivo entrenamiento en la especialidad es casi imposible

realizar, porque se carece de adecuados servicios para llevar a cabo una seria especialización. Sin embargo, la Sociedad Peruana de Medicina Nuclear fue la primera en su género que se creó en Latinoamérica, fundada en Lima, donde se estableció la Asociación Latinoamericana de Medicina Nuclear. Además, el Primer Congreso Latinoamericano de Medicina Nuclear se realizó en Lima y los médicos nucleares peruanos jugaron un rol decisivo en la creación de la Federación Mundial de Medicina Nuclear, ahora rigurosa institución.

En 1983 ya se había acumulado una amplia experiencia en gammagrafía médica. S. Falcón y A. Torres, en el IPEN hicieron una revisión de gammagrafía hepática de 91 pacientes, provenientes de diversos hospitales metropolitanos: Hospital Arzobispo Loayza (la mayoría), Hospital Dos de Mayo, Hospital General Cayetano Heredia, Hospital Hipólito Unanue e INEN. Para ello se usó coloides marcados indio 131m o tecnecio 99m. El radiofármaco es inyectado por vía endovenosa, pudiéndose empezar el examen 10 minutos después o más tarde si se sospecha insuficiencia hepática, obteniéndose imágenes en posiciones anterior, lateral derecho y posterior del hígado, completándose con el lateral izquierdo si la situación lo requiere. El análisis proporciona informaciones sobre forma y tamaño del hígado, presencia de lesiones o defectos focales hiperactivos, o concentración irregular del radiofármaco y caracteres de la imagen esplénica (bazo) que forma parte del estudio.

En 1983, S. Falcón et al.² presentan la evaluación de 41 pacientes de cáncer de próstata mediante gammagrafía ósea. La gammagrafía ósea es utilizada de rutina en los procedimientos de evaluación de enfermedades neoplásicas, especialmente en tumores primarios que metastizan con frecuencia a los huesos. Esta técnica no es invasiva y permite la detección precoz de metástasis ósea.

Vemos entonces la utilidad de los radioisótopos, entre los cuales el tecnecio 99m es el que más se produce en el C.N. "RACSO". En ese sentido, el generador de tecnecio es un comodín que se adapta a casi todos los problemas prácticos de la medicina nuclear, marcando siempre diferentes compuestos con tecnecio. Otro radioisótopo muy usado en el Perú es el yodo 131, producido en el C.N. "RACSO", el que nos permite tratar el cáncer metastásico de tiroides.

Sin embargo, existen otros elementos que son importados, como el galio

²S. Falcón, R. Cano y C. Guzman, *I Congreso Latinoamericano de Oncología*, 1983, Lima

67, el talio 201, yodo 123, para identificación de neoplasias linfáticas. El indio 111, entre otros, que sirve para marcar los anticuerpos monoclonales, ha generado expectativas en la medicina nuclear como posible elemento de diagnóstico y tratamiento específico sobre los órganos endocrinológicos.

En el Perú se domina también la técnica del RIA, mediante la cual el material radiactivo -en forma de moléculas marcadas de diversa índole- se utiliza para hacer dosaje de sustancias que se encuentran en el organismo en cantidades muy pequeñas -del orden de miligramos, microgramos, nanogramos, y picogramos. En el RIA se dosa una serie de antígenos, marcadores tumorales, vitaminas, enzimas, etc.

Con el RIA, en el CMN se está midiendo procedimientos de desplazamiento molecular. Para ello se cuenta moléculas marcadas con radioisótopos.

R. Cano, investigador principal del CMN, ve perspectivas favorables para esta especialidad en el Perú, porque han aparecido nuevos fármacos y radionucleidos que permiten realizar evaluaciones de compuestos como los neurotransmisores, alcanzándose dominios de frontera en el cerebro.

En 1982, C. Seminario et al.³ dieron cuenta de un interesante esfuerzo para escoger la técnica más adecuada en el Perú para la marcación radiactiva del fibrinógeno humano liofilizado. Como resultado se escogió la técnica del monocloruro de yodo modificada, por ser uno de los más recomendados para la marcación de moléculas protéicas. Como radioisótopo se usó el yodo 131.

El IPEN ha adquirido experiencia en la síntesis y marcación radiactiva de fármacos. En 1989, el equipo de E. Chacón realizaba marcación de algunos productos con tecnecio 99m. requeridos para la gammagrafía ósea⁴.

El desarrollo de medicina nuclear depende críticamente del abastecimiento de radioisótopos. Ello se puso de manifiesto en el fatídico mes de setiembre del 1988, en el que hubo un golpe duro para la economía del Perú. Las importaciones en general decayeron y el IPEN, que es la institución que los importaba y abastecía el mercado nacional, dejó de hacerlo por falta de divisas.

La solución que tomaron los centros médicos y clínicas privadas fue la de importar cada uno por su propia cuenta. En consecuencia el costo se elevó considerablemente.

³C. Seminario, T. Capillo y J. Montañez, *XI Congreso de Panamericano de Farmacia y Bioquímica*, Lima, noviembre 1982

⁴E. Chacón, C. Cruz, J. Caballero y J. Quezada, *Informe Nuclear*, vol. 5, No. 1, enero 1989

Actualmente gran parte de los radioisótopos usados en los centros hospitalarios peruanos provienen de la PPR del C.N. "RACSO", el que usa el reactor RP-10 que entró en operación en 1989. Su primera prueba de producción de radioisótopos fue en enero del 1990, comenzándose a comercializar, inmediatamente. Se empezó con yodo 131. A principios de abril de 1990 se comenzó a vender tecnecio en forma de pertecnetato de sodio en solución.

El yodo es usado en dosis pequeñas -para diagnóstico de tiroides- y en dosis altas -para terapia de cáncer. El tecnecio se usa para marcación de *kits* para estudios *in vivo*. El IPEN proporciona el *kit* y el tecnecio.

Como hemos mencionado, actualmente se produce yodo 131 y tecnecio por extracción. El oro 198 no se hace por falta de demanda, y los generadores de Mo-Tc tampoco debido a las pocas horas de operación del reactor. En cuanto a los generadores de Sn-In han sido desplazados por los de Mo-Tc.

En 1990 se produce para la venta 3,5 Ci mensuales de yodo 131, y 25 Ci de tecnecio 99. En 1991 bajó a la mitad, debido a una parada del reactor por mantenimiento y los usuarios empezaron a importar. Las ventas significan 2 450 dólares por yodo 131 y 6 200 dólares de tecnecio 99. En promedio se produce 50 *kits* que significa 750 dólares. En total se tiene unos 10 000 dólares por ventas mensuales.

En el dominio de la medicina nuclear, los radioisótopos producidos en Huarangal equivalen al 99% en Lima. Los importados son cloruro de talio 201 para estudios cardiacos y citrato de galio 67 para infecciones, que sirven para diagnóstico.

R. Cano recomienda el uso del estroncio 89 para el tratamiento del dolor en el paciente con metástasis ósea múltiple, ya que hace 3 meses la FDA de los Estados Unidos ha autorizado el METASTRON, nombre comercial del estroncio 89.

Para C. Guzmán, Jefe del Centro de Medicina Nuclear del IPEN, ahora bajo la conducción de INEN, la medicina nuclear debe mantener su independencia debido a sus posibilidades en bioquímica, inmunología, que son aplicables a la obtención de imágenes estáticas y dinámicas y al radioanálisis que nos permiten dosar en cantidades mínimas en los líquidos orgánicos.

4-A Apéndice

Dosimetría y riesgos radiológicos

Las aplicaciones médicas de la radiación nuclear tienen riesgos inherentes a sus propiedades destructivas de células. Ello ha llevado a profundos estudios sobre los efectos de la radiación en seres vivos, los mismos que dependen de la energía absorbida por los tejidos expuestos.

Para medir la dosis absorbida se ha establecido como unidad el *gray* (Gy), definido como un por kilogramo, donde el *joule* (J) es una unidad de energía en el Sistema Internacional (SI).

$$1Gy = 1J/kg \quad (4.1)$$

Antes de la adopción del SI, la unidad de dosis radiológica era el *rad*, que significaba la radiación absorbida de 100 ergios (ergs) por gramo, en el sistema c.g.s.

$$1rad = 100ergs/g \quad (4.2)$$

Como 1 joule es 10 000 000 ergios y 1 kilogramo es 1000 gramos,

$$1Gy = 100rads \quad (4.3)$$

Los efectos de la radiación en los tejidos dependen del tipo de radiación. Por ejemplo los neutrones producen cataratas con mayor eficiencia que los rayos X. Por ello fue necesario definir la *eficacia biológica relativa* (RBE), como la razón de la cantidad de energía de rayos X de 200 keV requerida para producir un efecto dado, a la energía requerida de cualquier radiación para producir el mismo efecto.

Para fines médicos, se usa un límite superior de RBE para los efectos más importantes, como un factor de normalización. Este factor de normalización es llamado *factor de calidad* (QF).

Para tomar en cuenta tanto los aspectos físicos como biológicos, finalmente se ha adoptado el concepto de dosis equivalente *H*, teniendo como unidad el *sievert* (Sv) definida como

$$H, \text{ sieverts} = D, \text{ grays} \times QF \times DF, \quad (4.4)$$

donde DF es un factor que toma en cuenta la distribución no uniforme de la radiación en los tejidos.

En el tratamiento médico con radiación se ha tenido muy en cuenta los efectos negativos, para evitarlos y brindar un óptimo servicio al paciente. Por ejemplo, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el OIEA, en colaboración con numerosos laboratorios de calibración y con la Oficina Internacional de Pesos y Medidas, han desplegado un gigantesco esfuerzo de investigación para que los pacientes que padecen cáncer reciban dosis correctas cuando se usa el cobalto 60 como fuente de radiación.

La importancia de este trabajo reside en la preocupante proyección de los casos de cáncer que van en aumento, y llegan hasta el 20% de los habitantes de algunos países.

La medicina moderna es un claro ejemplo de la forma cómo el hombre obtiene beneficios de la ciencia y la tecnología a cambio de ciertos riesgos. Los rayos X conllevan riesgos que pueden disminuir con la aplicación de la tecnología moderna. Cabe preguntarse si en el Perú usamos los rayos X con la debida seguridad.

¿Cuán seguro es el uso de rayos X en medicina? es una pregunta pocas veces planteada porque el beneficio del diagnóstico es tan evidente que uno no vacila en tomarse una radiografía en caso necesario. El hecho es que los rayos X conllevan riesgos. Por ejemplo, se ha mostrado que un uso exagerado de mamografías aumenta en forma alarmante los casos de cáncer en las mujeres. En los Estados Unidos, a mitad de los años 70, hubo pánico por el aumento de casos de cáncer de pecho. Ello se debió a la demanda de mamografía y a la falta de formación de los médicos que la aplicaban. El mal uso de la radiografía fue considerado como totalmente irresponsable y fue descrito como una “clara ilustración del incontrolado uso de la radiación que para la población es más peligroso que todas pruebas de bombas nucleares y la generación de energía nuclear”⁵.

La humanidad vive preocupada por su seguridad, pero muchos enfocan su atención en lo que parece espectacular, como es por ejemplo el riesgo de las centrales nucleares, pero no se preocupan por disminuir de los riesgos

⁵Barrie Lambert, *How Safe is Safe? Radiation*, 1990).

de algo tan común como los rayos X. Olvidan también que ver televisión conlleva -aunque en pequeña medida- riesgos adicionales de cáncer.

La importancia del tema es más evidente cuando se sabe que el peligro aumenta exageradamente si se usa equipos viejos o técnicamente defectuosos. En ese sentido, cabe mencionar que en los países industrializados es mucho más barato disminuir los riesgos de cáncer mejorando y haciendo una buena revisión de los equipos de rayos X que buscando bajar la dosis debida a las centrales nucleares.

En nuestro país tenemos numerosos equipos de rayos X completamente obsoletos o en mal estado. Por ello, cuando uno se toma una radiografía debería asegurarse que tanto el equipo como el operador tienen las licencias respectivas. Cabe señalar que los propios operadores corren riesgos originados por las dosis de radiación que reciben por su trabajo.

Es necesario conocer que el concepto de seguridad toma en cuenta la relación entre el riesgo y el beneficio. En el caso de los rayos X, éstos están limitados a los usuarios del tratamiento (Muchos riesgos tecnológicos recaen sobre gente que no obtiene beneficio alguno, lo que es inaceptable). Aún así, debe usarse los conocimientos actuales para que se brinde el mismo servicio con la mayor seguridad. A ello se dedican los físicos especializados que regularmente ofrecen cursos en el CSEN del IPEN, con vista al licenciamiento de operadores.

Chapter 5

Agricultura y Alimentación

5.1 Demografía y alimentación

En 1923, G. de Hevesey utiliza sustancias radiactivas para estudiar el metabolismo del plomo en las plantas. Las sustancias radiactivas abren así un campo fructífero de investigaciones que tienden a:

- determinar las condiciones óptimas en la utilización de fertilizantes y agua, así como la fijación del nitrógeno,
- mejorar las plantas mediante la mutaciones radioinducidas,
- erradicar plagas mediante el método de la radioesterilización del insecto macho,
- mejorar el rendimiento reproductivo, la nutrición y la salud de los animales, usando la técnica del RIA y de los radiotrazadores,
- conservación de alimentos y eliminación de los brotes y la contaminación después de la cosecha mediante la irradiación,
- eliminación de bacterias o virus de alimentos mediante irradiación,
- estudio de los mecanismos de contaminación por los plaguicidas y productos agroquímicos.

La agricultura ha sido siempre fundamental para el desarrollo de la humanidad. En la historia se ha visto que la producción de alimentos es crucial para la paz. Esta producción debe aumentarse continuamente por el

crecimiento de la población. Hace unos diez a doce mil años, la población mundial era de unos quince millones de habitantes. Hoy, la población mundial es más de 4 mil millones de habitantes.

En la producción de alimentos se recurre a una serie de técnicas, entre las que se tiene el mejor uso de fertilizantes, el empleo de sistemas múltiples, el control incipiente de granos, el desarrollo de grandes irrigaciones con la extensión agrícola y el desarrollo de variedades mejoradas.

A lo largo de la historia han habido muchas investigaciones en el empleo de la radiación nuclear para el estudio de los alimentos, pero éstas se intensifican en la década de los cincuenta.

Entre las principales aplicaciones nucleares que han tenido éxito reconocido, se encuentran el mejoramiento de plantas por mutaciones y el uso óptimo de fertilizantes. Esta última a través del estudio de mecanismos de absorción de fertilizantes. Se utilizan abonos marcados con isótopos radiactivos, como fósforo 32, o con isótopos estables, como el nitrógeno 15. De esta manera se puede optimizar el uso de los fertilizantes; es decir, suministrar a las plantas lo que necesitan para dar rendimientos rentables y evitar la pérdida excesiva de los abonos. Recordemos el alto costo que tienen estos productos en la agricultura y, además, el peligro del uso excesivo del abono en la contaminación del medio ambiente.

Otro punto importante es el control de plagas. Se calcula que las plagas disminuyen la producción normal de alimentos en más o menos un diez por ciento, equivalente a la producción de alimentos, por ejemplo, de países como los Estados Unidos. El control de plagas, utilizando técnicas nucleares, se hace mediante el desarrollo de insectos estériles, los cuales se incorporan a la población insectil en la zona infectada, con la consiguiente disminución de las poblaciones.

Otro aspecto es el mejor uso de los recursos hídricos, mediante el estudio del reciclamiento de aguas superficiales y subterráneas.

La conservación de alimentos es otro aspecto importante, dado que existen evidencias que se pierde un treinta por ciento de los productos alimenticios. En esta línea también existen casi treinta años de investigación con el uso de radiaciones ionizantes.

Tenemos otras aplicaciones, como por ejemplo, el estudio de la fisiología vegetal y, finalmente, el mejoramiento genético de las plantas utilizando inducción de mutaciones.

5.2 Mutación genética de plantas

Desde el inicio del siglo XX, las mutaciones han jugado un papel importante en la evaluación de los cultivos, junto con los métodos de irrigación y selección. La mutación es un cambio súbito que ocurre en el material hereditario de una planta y que se transfiere de generación en generación. En 1908 ocurrió la primera observación de mutación genética, y en 1928 se empleó los rayos X para generar cambios. Desde 1918, en Italia, se utilizaron rayos ultravioleta para inducir mutaciones.

En 1950, empieza el uso de los rayos gamma y neutrones térmicos como los agentes mutagénicos físicos de tendencia nuclear. Después del uso de estos agentes físicos surge el uso de agente mutagénico químico. Sin embargo, el éxito que se esperaba de estos productos no estaba planeado, debido, principalmente, a que las mutaciones son bastante similares a las que se obtienen con los rayos gamma y que existe el peligro de que la mayor parte de estos agentes mutagénicos químicos tengan principios cancerígenos.

A partir del año 1969 la investigación básica fundamental de la inducción de mutaciones cambia a una aplicación práctica en el mejoramiento genético de plantas. Hasta antes de 1969, la agricultura se ha beneficiado con 167 variedades. Entre 1969 y 1986 se han desarrollado 800 variedades. La mayor parte de éstas son cereales, que más o menos incluyen 90 especies a nivel mundial. Por ejemplo, se han desarrollado 529 variedades de propagación por semillas y 305 en aquéllas que tienen propagación vegetativa.

Analizando el impacto de los agentes mutagénicos de origen nuclear, podemos decir que los rayos gamma han sido los más eficientes, tanto en las plantas que se propagan por semilla como en las que se propagan vegetativamente. Actualmente es uno de los métodos más utilizados, por la facilidad de aplicación, y porque permite el movimiento de semillas de un país a otro. Es un método de bajo costo para el experimentador. Las variedades desarrolladas son muchas. En el caso del trigo, que se utiliza para la elaboración del pan, se han desarrollado 80 variedades a nivel mundial. En el caso de la cebada, 77 variedades, del algodón 8, de soya 22 y más o menos 529 en aquellas variedades que se propagan por semilla, como hemos señalado antes.

Los caracteres modificados mediante la inducción de mutaciones en las plantas, generalmente son morfológicos, que incluye una reducción de altura, cambios en la forma de hojas y en el diámetro del tallo.

Otra característica importante que cambia en la mutación es la precoci-

dad y el rendimiento. Se logra cambios en la calidad para la alimentación humana y en la resistencia al micro-organismo, insectos, nemátodos. También se mejora la adaptación, la facilidad de cosecha y la resistencia al frío.

Se ha logrado una de las variedades de trigo Durun, un trigo especial para la elaboración de fideos, que fue producido por inducción de mutaciones en una año agrícola de Italia, a nivel agricultor, y dio un beneficio de siete millones de dólares en ese año.

Las investigaciones sobre mutaciones genéticas en el país son desarrolladas por el equipo de M. Romero, en una discreta zona de los amplios terrenos de la Universidad Nacional Agraria (UNA), donde se ha establecido los locales del Programa de Cereales ¹. Allí, el investigador M. Romero se dedica a crear -en el laboratorio, por mutación- cebada sin cáscara y cereales que soporten las inclemencias de las alturas.

Las características de un ser viviente están grabadas en los genes que se encuentran en las células. El ácido desoxirribonucleico (ADN) constituye una gigantesca biblioteca, a partir de la cual se construye la vida en sus diversas manifestaciones. El cambio en la estructura del ADN en una célula se reflejará en la modificación de las características de sus descendientes. En algunos casos, el cambio es de tal magnitud que el ser se convierte en estéril.

En realidad, la evolución de las especies se debe a mutaciones espontáneas o, más precisamente, inducidas por elementos naturales. Los imperceptibles y numerosos cambios del ADN, a partir de las células iniciales en la historia de la Tierra, han dado lugar finalmente a la vida actual en todas sus formas.

Por ejemplo, el trigo y la cebada constituyen la manifestación final del proceso de mutaciones de esos cereales. Pero los investigadores no se contentan con presenciar los lentos cambios espontáneos, sino que los producen en el laboratorio. Estos cambios, que naturalmente toman millones de años, se logran en un período de cosecha.

El procedimiento de mejoramiento de plantas es relativamente simple. Se irradia -con una fuente de rayos gamma- cientos de miles de semillas del cereal. Se cultivan las semillas irradiadas y se observa su evolución. Estadísticamente, uno de cada 200 mil granos tiene una evolución positiva, es decir que es de mejor calidad que los granos iniciales. Se escogen las plantas con mejor calidad, cuyos granos serán usados para cultivar en gran escala.

Actualmente se ha logrado tres variedades de cebada. De éstas, la cebada

¹M. Romero, *Seminario Internacional sobre el Cincuentenario del Descubrimiento de la Fisión Nuclear*, Lima, 24-28 de abril de 1989, *Revista Peruana de Física*, Vol III, 1989

llamada Buena Vista ha alcanzado nivel comercial, siendo explotada por los campesinos de las alturas de Puno, con el apoyo de Cáritas.

Ante el requerimiento de los campesinos, los investigadores de la UNA han producido una cebada sin cáscara. Como se sabe, la cáscara de la cebada ofrece inconvenientes para usarla en harina, por ejemplo.

Actualmente, las investigaciones están buscando la reducción del ciclo del trigo. El ciclo del trigo es de 13 meses. Si se lograra reducirlo a 7 meses sería posible tener dos cosechas anuales. Ello permitiría asimismo disminuir los efectos climatológicos sobre el trigo. También se trata de obtener un trigo cultivable a más de 4 mil metros de altura, que resista al frío y las condiciones de esas alturas. Las mutaciones por irradiación han sido ensayadas también con otros cereales. Los resultados fueron diversos. La quínoa, por ejemplo, respondió erráticamente al tratamiento por irradiación.

Los esfuerzos de la UNA en el mejoramiento de plantas por irradiación, apoyada por el OIEA, han dado resultados que merecen ser explotados a gran escala. En esa dirección es necesario un mayor apoyo de organismos estatales y privados.

Se ha logrado variedades precoces. En el caso del frijol, se ha conseguido precocidad, cambios en el hábito de crecimiento de la planta, resistencia a la Raya y al Medu, que son enfermedades muy importantes en el frijol. En el caso del algodón, la quinua, la kiwicha y el trigo, los estudios todavía son preliminares.

El OIEA, a partir de 1978, comenzó a apoyar las investigaciones en la UNA, no sólo a través de equipos, sino también a través del entrenamiento de personal.

5.3 Cultivos bajo condiciones extremas

Los cultivos que surgieron en el Perú, como en todo el mundo, tienen un potencial de rendimiento. La papa -un cultivo que es oriundo del Perú- tiene un potencial de rendimiento actual de 94 toneladas por hectárea. En el Perú, la producción en promedio supera los siete u ocho toneladas por hectárea. A nivel mundial, los rendimientos están en 28 toneladas por hectárea. Los rendimientos potenciales de los cultivos se ven mermados por una serie de factores, entre los cuales tenemos: enfermedades, plagas, medio ambiente desfavorable, etc.

En algunos cultivos existe una pérdida debido a los insectos, la que alcanza a un diez por ciento. Según L. Gómez², en el caso específico de la papa se ha calculado un 6,5% de reducción de alimentos por efecto de las plagas; por efectos de enfermedades un 8% ó 9% . El remanente, cerca de un 54% de la discrepancia que existe entre el rendimiento promedio y el rendimiento potencial, se debe al medio ambiente desfavorable, entre los cuales las malezas contribuyen con menos del 1% y el 54% se debe a problemas de sequía, heladas, salinidad, suelos pobres, etc. A estas condiciones se les denomina condiciones de *stress ambiental*.

En cuanto a las papas, éstas crecen en dos ambientes diferentes: suelo y atmósfera. Una serie de compuestos es incorporada a las plantas y, al final, tenemos carbohidrato. Luego, ese carbohidrato sirve para generar otros compuestos orgánicos. Las plantas necesitan del suelo y necesitan del ambiente. Absorben la energía solar. Sin embargo, estos factores no se encuentran en sus estados óptimos.

En la Sierra se producen heladas, bajas temperaturas, que afectan a la parte aérea. Se tiene sequía, deficiencia de agua; suelo pobre, déficit de nutrientes. El *stress* iónico también puede ser por problemas de salinidad, exceso de agua, anegamiento, o déficit de agua, sequía, temperaturas bajas. El *stress* por heladas mata el follaje. En algunos cultivos, se tiene temperaturas altas.

Para el estudio de la fisiología de las plantas se usan algunos radioisótopos, como el carbono 14. Con este radioisótopo puede hacerse estudios de fotosíntesis, porque la asimilación del carbono, la incorporación del radioisótopo, entre otros, son procesos fotosintéticos. La fotosíntesis ocurre gracias a la acción de la luz. El carbono 14 es una gran herramienta para hacer este tipo de estudios fisiológicos, estudios fotosintéticos. En la asimilación de carbono, de traslocación de carbono, ¿dónde se incorpora? ¿toda la planta tiene la misma capacidad?. La respuesta a estas interrogantes se obtiene en investigaciones usando carbono 14. ¿qué pasa con este carbono incorporado al follaje? ¿cómo se trasladan en los tubérculos por ejemplo? ¿cómo se incorpora? ¿en qué tiempo se incorpora? ¿con qué velocidad es posible hacer estos estudios con las técnicas nucleares?.

Los radioisótopos sirven para estudios a nivel de suelos, de absorción del ambiente. Añadiendo a isótopos estables nitrógeno 14, se hace estudios de

²L. Gómez, *Seminario sobre el Cincuentenario del Descubrimiento de la Fisión Nuclear*, Lima, 24-28 de abril de 1989, *Revista Peruana de Física*, Vol III, 1989

protección nitrogenada.

Las fuentes de neutrones rápidos, que son atenuados por el agua, permiten hacer estudios hídricos, de sequía, de balance hídrico en el suelo. Podemos mencionar tres tipos de investigaciones: a nivel controlado, a nivel de condiciones medianamente controladas y a nivel de campo. Es importante no solamente hacer estudios en laboratorio, sino también estudios *in situ*, en el lugar donde se presenta el problema.

Se ha cultivado la papa y el maíz, entre otros, los que están creciendo sin problemas. En la SAIS Túpac Amaru -que está a tres mil setecientos metros de altura, se estudió el caso del cultivo de la papa. La helada, la baja temperatura de la noche, trae como consecuencia la muerte de las hojas. Cuando la helada es ligera, mata la parte superior; y si la helada es más fuerte, mata todo el follaje. Si la planta aún no ha formado su tubérculo, las pérdidas son cuantiosas. Se puede perder toda la cosecha por una baja de temperatura. Solamente en unas pocas horas puede matar la planta o disminuir su rendimiento.

Cuando se controla la humedad, la temperatura, la luz, el CO₂, etc. se pueden hacer estudios de la fisiología de las plantas donde la tierra controla esos parámetros. Se puede incorporar el carbono 14 para la fotosíntesis, migración del carbono, la captación del carbono por las hojas, la traslocación, etc. Para realizar los respectivos estudios, se cuenta con un sistema integrado. Parte de ello es una cámara que permite el control de la radiación mediante un tubo Geiger, que permite hacer mediciones de la actividad del carbono 14. De esta manera se tiene el control de la concentración del CO₂ dentro de la cámara, porque es importante que tratemos de obtener condiciones ambientales casi parecidas al ambiente normal. El CO₂ está en un ambiente normal de 320 partes por millón, 350 con tendencia a crecer. Este es otro aspecto importante en el balance del carbono. Entonces se hace el conteo respectivo y se determina la concentración del carbono en la cámara, entre otros parámetros. Con estas cámaras podemos hacer evaluaciones, por ejemplo, en el caso del maíz. En ese caso hemos comprobado que las hojas de las plantas no contribuyen de igual manera al llenado de la mazorca.

Se ha comprobado que las hojas que más contribuyen al llenado de la mazorca son las hojas que están próximas a ella. En otras palabras, cuando se está llenando la mazorca pueden faltar las hojas del tercio superior y del tercio inferior y los rendimientos no son disminuídos. Esto es trascendental porque de repente el agricultor encuentra algún problema, alguna plaga,

enfermedad, en estas hojas inferiores y el agricultor preocupado les aplica un pesticida, insecticida, cuando ya no es necesario, si las hojas que están rodeando la mazorca no son afectadas.

En lo que respecta al *status* hídrico, se utilizan diversos equipos, técnicas nucleares y técnicas convencionales. Se utilizan detectores para medir la radiación, luxómetros, termómetros, porómetros, etc., para medir transpiración, un microvoltímetro para medir el potencial de agua de suelo, de hojas, etc. Se tiene que disponer de algunos equipos para medir ciertos parámetros, medir tanto *in situ* como en otras condiciones. Tenemos que comprobar cuál es la variación diurna de esos parámetros. Entre las técnicas nucleares, tenemos equipos portátiles para aplicar el carbono 14 a las hojas.

Para investigar las situaciones de *stress* se realiza estudios en el campo. Por ejemplo tiene que verse porqué una papa silvestre resiste a la helada. Primero hay que ver fisiológicamente por qué está ocurriendo eso. C. Martínez et al.³ hicieron un trabajo en la SAIS Túpac Amaru. En la parte más alta. Se estudió papas; unas cultivadas y otras silvestres, para determinar *in situ* cuál es el mecanismo de respuesta. Debieron llevar equipos por diversos medios hasta las zonas altas. Trabajaron con un experto de la Universidad de Utah. Comprobaron, *in situ*, cuál era el mecanismo de respuesta de las plantas en su fotosíntesis, en su transpiración, en su temperatura de hoja; cuál era el curso diurno de las hojas, de parámetros ambientales. Se tuvieron que quedar en el lugar para saber lo que estaba pasando en noche. Cómo está variando la temperatura, la humedad, la radiación fotosintéticamente, la temperatura de ambiente, la temperatura de hoja, la temperatura de suelo, la humedad del suelo, etc., y cómo la planta está buscando su fisiología, su metabolismo a esa condición, y porqué resiste más que otros. Esos estudios son fundamentales. Primero para entender cuál es el mecanismo de defensa de las plantas y luego para incorporar esos mecanismos a nivel genético.

Cabe resaltar el hecho que algunas de las sustancias radiactivas para el estudio de plantas han comenzado a ser producidas en el país. J. Rodríguez y M. Castro⁴ mostraron cómo obtenían el superfosfato triple a partir de la roca fosfórica de Bayovar y los marcaban con fósforo 32. Este radiosótomo permite estudiar los problemas de metabolismo animal, de la relación entre

³C. Martínez, *Seminario sobre el Cincuentenario del Descubrimiento de la Fisión Nuclear*, Lima, 24-28 de abril de 1989, *Revista Peruana de Física*, Vol III, 1989

⁴J. Rodríguez y M. Castro, *XIII Congreso Peruano de Química*, Lima, 11-16 de octubre de 1982

la planta y los alimentos del suelo, de los oligoelementos, de los abonos, de la fotosíntesis, del control de plagas y de la mala hierba.

El C.N. "RACSO" tiene planeado producir el fósforo 32, cuya técnica está desarrollada. El fósforo 32 es usado para agricultura.

5.4 Irradiación de alimentos para la conservación

Los rayos que emiten los radioisótopos son electromagnéticos, caracterizados por su longitud de onda o su frecuencia. Las ondas de radio son de baja frecuencia y de longitud de onda grande, del orden de los metros.

A medida que la longitud de onda disminuye se tiene los rayos de luz visible ultravioleta, rayos X, los rayos gamma, los rayos cósmicos. Los rayos X tienen longitudes de onda del orden de Amstrongs (10^{-10} m). Los rayos gamma tienen una longitud de a nivel de picómetros (10^{-12} m), por esto la tecnología es denominada pico-onda.

Entre las aplicaciones de la radiación ionizante, se tiene la irradiación de una gran gama de productos alimenticios para su conservación y de material médico para su esterilización.

En 1940, por primera vez se avizora la posibilidad de utilizar la radiación ionizante para tratar alimentos con fines de conservación o de esterilización, según sea el caso. En los Estados Unidos se toma la iniciativa y se comienza a desarrollar una serie de investigaciones, tanto en la Comisión de Energía Atómica (ACE) como en el Ejército de los Estados Unidos. A partir de 1959 ambas instituciones inician trabajos de investigación conjunta, dividiéndose los temas. La ACE aborda lo referente a la aplicación de dosis bajas de radiación con fines de preservación de alimentos para uso civil. El Ejército, en Massachusetts, construyó una planta de irradiación de 1 300 000 curies de cobalto 60 y un acelerador de electrones.

Se aborda un plan interno de verificación de la tecnología con fines de una dieta de guerra y se trata productos como carne de cerdo, carne de pollo, pescado, etc. Esta evaluación permite, en 1923, a la Fruit y Graham Administration -encargada de autorizar la comestibilidad de productos en los Estados Unidos- aceptar, por primera vez, un producto irradiado para consumo humano que fue el tocino. El tocino quedó casi esteril porque se le había aplicado una dosis de 4,5 megarads -excesiva pero explicable para estas primeras investigaciones. Al año siguiente, en 1924, se aprueba la papa.

A lo largo de los siguientes años ya toman parte el OIEA, la FAO y la OMS. Japón toma la vanguardia en la investigación. Actualmente la técnica la tienen India, Italia y los Países Bajos, entre otros.

Desde la década del 50 hasta nuestros días, se ha evidenciado las ventajas de esta tecnología para la mayor parte de los productos. Una docena de productos fueron recomendados por el código alimentario para aplicar una dosis de 10 kilorads con absoluta garantía de comestibilidad.

Es pertinente saber que en los productos no hay activación, contaminación del producto, que por lo general es una idea errada en el público.

Las fuentes que se utilizan son de cobalto 60 o cesio 137. La energía de los rayos gamma en un caso es de 1,17 a 1,33 MeV y en el otro de 0,66 MeV, que son energías que no inducen absolutamente nada de irradiación. En lo que respecta a las fuentes instrumentales se pone un tope de 10 MeV para el caso de aceleradores de electrones y de 5 MeV para el caso de rayos X. Entonces, con estas condiciones, se garantiza que los productos no serán activados.

Para los casos de la papa, cebolla, olluco, con dosis baja de irradiación se logra la inhibición del brote, y la infertilización. La papa puede permanecer un año a temperatura ambiental sin observarse brotes.

En Lima, es fácil imaginar la ventaja de irradiar productos en la época de mayor cosecha -es decir abril y mayo- para venderlos después de 5 ó 6 meses que es el período de poca cosecha y altos precios.

Para el caso de los granos, el efecto de irradiación nos permite eliminar los insectos durante el almacenamiento. En el caso del frijol castilla irradiado, se mantiene durante 6 ó 7 meses, mientras que las no irradiadas se deterioran, se obtendrá el polvo del frejol, producido por el metabolismo del insecto.

Con la dosis un poco mayor para tubérculos y bulbos se puede lograr la eliminación de los insectos, con la ventaja de que puede irradiarse el producto envasado.

En el caso de la fruta, otra de las aplicaciones, se obtiene el retardo de la mohación. Irradiando la fruta puede lograrse el retardo de la mohación y también la eliminación del insecto que está en el interior de la fruta. Hay mandarinas que tienen más de 45 días: las irradiadas se mantienen en buenas condiciones, mientras que las de control ya están deshidratadas y desmohecidas igual que ollucos, papas y cebollas.

La técnica de irradiación puede reemplazar al fumigante químico que se utiliza después de la cosecha -por ejemplo el mohetileno, que está prohibido

en muchos países entre los que se tiene a los Estados Unidos.

Otra ventaja de esta tecnología es que los frutos pueden irradiarse envasados. Los autoenvasados pasan por la planta de irradiación y se comercializan directamente y con una calidad sanitaria aceptable. Entre los países que están comercializando los productos irradiados se encuentran los Estados Unidos, Canadá y Rusia.

También es necesario tomar en cuenta la potencialidad para eliminar la carga microbiana de los alimentos.

Asimismo podemos deducir que vamos a incrementar nuestras posibilidades de exportación, no solamente por esa ampliación en el tiempo de comercialización, sino también porque esta tecnología nos va permitir el poder vencer determinadas barreras sanitarias en los grandes mercados.

Los mangos son, por ejemplo, algunos de los productos peruanos de exportación que no pueden ingresar al mercado de los Estados Unidos, simplemente porque el fumigante que se aplicaba para eliminar la mosca de la fruta está totalmente prohibido. Todo producto debe tener un proceso previamente aprobado por las autoridades del país receptor.

En este caso particular, el método de irradiación permitirá vencer rápidamente estas barreras e incrementar la exportación. Entonces, en resumen, podemos observar que tanto para el consumo nacional como para la exportación tenemos una aplicación inmediata.

Es importante mencionar algunas de las características de las instalaciones usadas para la irradiación para fines de conservación. Una planta de irradiación es la infraestructura donde se va a realizar el proceso de la irradiación de productos. Esta se compone esencialmente de cuatro partes: 1) la infraestructura de concreto armado, con paredes de entre metro a metro y medio de espesor que sirve como blindaje; 2) la fuente radiactiva 3) la piscina de almacenamiento de la fuente radiactiva, donde se tiene el agua desionizada, que además sirve como blindaje, principalmente cuando no se esté operando y, finalmente 4) el sistema electromecánico y la consola del mecanismo de control de operación. En este caso es una faja transportadora que trae los productos al operador.

En el proceso de irradiación, el cobalto no está en ningún momento en contacto con el producto que se va a irradiar, el que está expuesto a los rayos electromagnéticos que tienen la característica de ser altamente penetrantes.

Se coloca los productos en una faja transportadora y se va introduciendo al interior de la planta de irradiación, en forma de un laberinto, y colocando

las cajas envasadas en forma ordenada que circulan alrededor de la fuente radiactiva. Se supone que en este momento la fuente radiactiva ya está en la superficie. Así se forma un circuito en un tiempo en el que el producto absorberá una dosis de irradiación.

En síntesis, el proceso es muy simple, solamente ingresan las cajas a través del laberinto, colocadas alrededor de la fuente, haciendo un circuito en un tiempo determinado. Luego, las cajas se retiran a la zona de descarga.

El producto, prácticamente no tiene ninguna alteración, después del proceso no se puede diferenciar si está o no irradiado.

En el IPEN, desde el año 1980 se están efectuando una serie de investigaciones o trabajos confirmatorios sobre preservación de alimentos y esterilización de equipos médicos.

Se cuenta con tres unidades de irradiación a nivel laboratorio: la primera es un almacén de cobalto 60, canadiense, cuya cámara de irradiación tiene un volumen de tres litros. Es un cilindro de 20 cm de altura por 15 cm de diámetro. Las dos restantes son de cesio. Con estos equipos, el IPEN efectúa los trabajos a nivel laboratorio.

En el interior se encuentra un cilindro de fuentes de cobalto. Se colocan las muestras y, después, estas muestras van a encajar justo en el cilindro donde está la fuente radiactiva. Se controla el tiempo que se requiere para cada aplicación.

5.5 Historia de una planta de irradiación

Una de las actividades de mayor proyección social es la conservación de alimentos por irradiación. Ello requiere la instalación de plantas de irradiación en los lugares de producción. El IPEN está construyendo una planta de irradiación multiuso con fines de promoción de la tecnología.

El año 1978, el OIEA había donado una facilidad de irradiación con 10 000 curies. En esta facilidad se realizaron una serie de experimentos sobre conservación de alimentos y plantas.

En 1984 el OIEA y la Unión Soviética firmaron un contrato para proporcionar una planta de irradiación multiuso (PIMU). La empresa comercial que proporcionaría la planta es la TESCHNAVEXPORT. El monto de la donación fue de 900 000 dólares. La donación inicial consideraba una fuente de 100 kC, pero su capacidad nominal máxima es de 630 kC.

El 12 de mayo de 1986 se formó una comisión⁵ para estudiar las posibilidades de la tecnología de irradiación en el país. El proyecto tenía como objetivo realizar los estudios y formular las recomendaciones sobre la preservación de alimentos por irradiación nuclear.

La recomendación fue positiva. El año 1986, por intermedio del IPEN, en el Proyecto PIMU, se obtiene el marco presupuestal para las actividades relacionadas con la investigación sobre el tema.

En 1989, el IPEN realizó la ingeniería básica y contrató a la UNI para la ingeniería de detalle.

En el contrato se estipula que el Perú debe construir el bunker y dar todas las facilidades para que lleguen los técnicos rusos para el montaje de la planta.

En 1991 el MEF aprobó un presupuesto de millón y medio para todo lo anterior. En licitación pública para las obras civiles de la planta ganó la Asociación Jaime Olaechea y Cáceres contratistas, otorgándoles la buena pro y firma del contrato en diciembre del 1991.

No se ejecutó el presupuesto por tardía adjudicación y no autorización de giro. En 1992 reduce el presupuesto a 922 mil soles, pero no autoriza giro.

Por otro lado, la empresa rusa aumentó sus precios, debido a las modificaciones que se han planteado a la planta original, en base a un acuerdo en Viena entre representantes del IPEN, de la empresa rusa y el OIEA. Ello asciende a 1 300 000, que se espera obtener de la cooperación del OIEA.

En 1993 el Gobierno peruano otorga 340 000 soles, faltando unos 400 mil soles para terminar la obra y recibir la fuente donada por el OIEA.

Se espera que se irradie una 20 000 toneladas de productos agrícolas, en dos turnos. Un tercer turno será dedicado a la esterilización de productos médicos, en unos 3,500 metros cúbicos.

Para dar una idea del mercado, la entrada al mercado mayorista de papas es de 1 000 toneladas diarias. El mercado cubierto es pequeño.

Cabe mencionar que la planta de irradiación sería más apropiada para irradiar productos deshidratados. Para obtener posibilidades de rentabilidad también tiene que pensarse en irradiación de productos médicos para

⁵Resolución Suprema No. 0193-86/AG. Esta comisión estuvo compuesta por el T. Aliaga (Presidente), J. Saldaña, L. Nuñez, C. Miletich, J. Dellepiane y J. Jáuregui, J. Arce. Las instituciones colaboradoras fueron el Instituto de Comercio Exterior (ICE), el ITP, ADEX y el IPEN.

radioesterilización.

Se ha propuesto la formación de una fundación para la tecnología de irradiación. Esa fundación puede subvencionar el análisis de la inocuidad del proceso y la investigación de nuevos productos.

Por otro lado, se espera que la empresa privada aporte recursos. Pero ninguna empresa privada parece estar tentado a unirse en accionariado donde el Estado tenga mayor porcentaje. Se piensa en una empresa de riesgo compartido, en el cual el IPEN ponga a disposición el local, infraestructura, equipos, en una especie de alquiler, donde la administración y el funcionamiento esté a cargo del socio privado.

El Estado pone el 49% de las acciones y el privado pone 51 %, cuantificado en cuotas de alquiler pactado, de modo que el IPEN siga dueño de la infraestructura. El accionariado del privado se pagará como alquiler.

El aspecto de la legislación debe abordarse en 3 rubros: el primero es la aprobación de la instalación misma, que en este caso está establecida por las condiciones por el OIEA. En nuestro medio sería el IPEN, o mejor dicho el Presidente del IPEN como Autoridad Nacional en el ámbito nuclear. La Autoridad Nacional tendría que licenciar y dar la aprobación desde la etapa de planificación hasta la etapa de operación de una planta de irradiación. Luego tenemos el de la aprobación de la tecnología para que se pueda realizar en el país, que estaría a cargo de Indecopi. Finalmente el de la aprobación de los productos en sí, los alimentos, que estaría a cargo del Comité Nacional de Medicamentos, Alimentos y Drogas - CONAMAD.

Otro aspecto que deberá tenerse en cuenta en la difusión de la técnica de irradiación de alimentos es la aceptación de los productos por parte del público. Un trabajo exploratorio fue llevado a cabo en la Feria de Agrotec en 1987. Allí se hizo una encuesta en grupos profesionales.

Algunas de las preguntas que se efectuaron en esa oportunidad fue que si había tenido miedo al probar alimentos irradiados. La respuesta del no fue de 80%.

A la pregunta si había notado diferencia en el consumo del producto. La respuesta del 88% fue no.

También se le consultó si el grupo dedicado a actividades de agricultura estaría interesados en conformar una asociación mixta para poder encarar una planta de este tipo, bajo un sistema de accionariado difundido. La respuesta sí fue del 82%.

A pesar del origen universitario de los encuestados, la respuesta de aproxi-

madamente el 80% fue que nunca había escuchado hablar de esta tecnología.

En resumen, la evaluación presenta indicios de que en el Perú existe la probabilidad de que esta tecnología sea realmente aceptable a nivel nacional.

Como hemos mencionado antes, para la conservación de alimentos se puede usar otras fuentes como rayos X, o aceleradores de electrones. En principio, la decisión de optar por la energía gamma, a través del cobalto 60, fundamentalmente está asociada a la mayor penetración, que permita una flexibilidad en una primera planta y poder trabajar con productos diversos. Para productos que son tratados en su envase final de distribución, la radiación gamma es más apropiada que los rayos X.

Debemos reconocer que hay temor por la energía nuclear, debido esencialmente a la forma espectacular que se usó en la segunda guerra mundial. Por ello es natural el temor respecto al proceso de conservación de alimentos. Por ejemplo, el enlatado, tardó 50 años en introducirse. Pero el último exponencial de la evolución tecnológica nos hace ver que este proceso, en el caso particular de los alimentos, está siendo cada vez más aceptado. Es así que en China se ha lanzado un programa de construcción de 15 de estas plantas para sus principales centros poblados. Son también los casos de Sudáfrica, Holanda, Japón, etc. Estamos en el umbral de la industrialización de esta tecnología.

El Perú, se espera que en 1994 podamos estar ahorrando una gran cantidad de alimentos que normalmente se pierden por falta de conservación.

Chapter 6

Aplicaciones Nucleares en la Industria

6.1 Radiotrazadores

Los países industrializados aplican las técnicas nucleares en casi todos los dominios industriales. Las propiedades de la radiactividad son adecuadas para el estudio de procesos o el control de calidad, los que se concibieron desde los primeros años que esas propiedades fueron descubiertas.

En los países del Tercer Mundo también se ha comenzado a utilizar las técnicas nucleares en la industria. Mencionemos el caso de la India, donde se construyó un oleoducto de 140 km para petróleo crudo. Se descubrió que ese oleoducto tenía pequeñas filtraciones. Las técnicas convencionales, como la presurización y la inspección visual resultaban muy lentas y caras. Usando la técnica de radiotrazadores se logró ubicar cinco filtraciones en seis semanas, ahorrándose 6 meses del tiempo para el proyecto y 300 000 dólares de costo. La producción adicional lograda como consecuencia significó 1,5 millones de dólares. Todo ello con un equipamiento sin sofisticaciones.

En la industria automotriz, los radiotrazadores permiten estudios de desgaste de piezas. Para estos estudios también se usa activación de superficies. Como ejemplo de las ventajas de las técnicas nucleares podemos señalar que los costos de prueba de una nueva camisa de cilindros de un motor son de 360 000 dólares. Con técnicas nucleares los costos bajan a 48 000 dólares. Dado que en un proceso tecnológico, normalmente se realiza 10 modificaciones, los

ahorros producidos por las técnicas nucleares ascienden a 3 112 000 dólares.

Pero el factor más importante en el desarrollo tecnológico es el tiempo, el que se ve reducido con las técnicas nucleares. Pruebas que toman 5 años con las técnicas convencionales, se logran en meses con las nucleares.

En el Perú, la idea de desarrollar la aplicación de radiotrazadores en la industria nace en 1983, con la visita del experto finlandés Veiko Kamarainen. En esa oportunidad se probaron técnicas con radiotrazadores y fuentes selladas en los laboratorios del CSEN.

Se llevaron a cabo experimentos demostrativos sobre tiempos de residencia en una torre de enfriamiento y en la Universidad de San Marcos sobre calibración de venturímetros.

Esos trabajos fueron desarrollados por un solo profesional. En enero de 1988 se integran otros dos profesionales, realizándose luego trabajos en Conchán y Pampilla. En Conchán se hizo el perfilaje de columna y, en convenio con el SIMA, se realizó perfilaje de dos columnas de refinamiento en la refinería de Ventanilla.

La antigüedad del equipo y la falta de un mecanismo de automatización no permitieron resultados enteramente satisfactorios.

En enero de 1992, se adquirió equipamiento moderno y portátil. Este consiste de un analizador de radiación gamma, un registrador y dos detectores de radiación.

Con radiotrazadores líquidos sólo se ha desarrollado técnicas de detección de fugas en tuberías en tanques de almacenamiento, medidas de caudal y velocidad de fluidos en procesos industriales. Todo ello en laboratorio.

Con radiotrazadores sólidos se ha brindado servicios a la industria del cemento, específicamente a la empresa Cemento Andino (Tarma). Utilizando como trazador el lantano 140, se optimizó el sistema rotativo N° 3. de dicha compañía, mediante la medida de los tiempos parciales de residencia. En lo referente a las aplicaciones con radiotrazadores se puede mencionar la determinación de velocidad de fluidos en canales, ríos, etc. También se hizo determinación de tiempo de residencias en reactores, intercambiadores de calor, condensadores y otros. Determinación de flujos volumétricos, detección de fugas, fallas, obstrucciones, tuberías cerradas, recipientes, períodos de circulación de fluidos, volumen de fluidos circulantes o almacenados, calibración de medidores de flujo tipo venturímetro, rotómetros, medidores de orificios y modelaje de sistemas industriales.

En lo referente al perfilaje de columnas de destilación, podemos men-

cionar algunos diagnósticos hechos por Petroperú en columnas de destilación, que es un recipiente tubular con ciertos platos distribuidos, regulados a través de la columna. En la parte inferior de este tubo se coloca el petróleo, que posteriormente calentado se va a condensar en los diversos platos, para finalmente extraerse destilado. La técnica nuclear puede diagnosticar el estado operativo del sistema. Con la fuente y un detector de radiación, mediante un barrido vertical de la parte superior hasta la parte inferior con una velocidad continua y regular, se observa en un gráfico una serie de picos y valles, generados por las columnas que poseen zonas de vapor y zonas de material sólido.

También se ubican las placas de corrosión en la columna, debido a la atenuación generada por esa placa de corrosión. Ahora, mediante perfiles de corrosión, se puede evaluar el desgaste de esa placa.

Con las técnicas de radiotrazadores, se hace también estudios de comportamiento dinámico de los fluidos que circulan en dispositivos industriales, permitiendo su control.

6.2 Instrumentos nucleares

Las características de la radiación ionizante emitida por los radioisótopos otorgan ventajas sustanciales a los instrumentos los usan. Estas ventajas son las siguientes:

- las mediciones se realizan sin contacto físico directo del sensor con el material estudiado,
- las mediciones se realizan en la misma cadena de producción y es no destructiva,
- existen fuentes de gran estabilidad y no necesitan mucho mantenimiento,
- son muy poco costosas.

Los instrumentos radioisotópicos son los únicos que permiten medir masas por unidad de superficie, facilidad que es bien aprovechada para una serie de aplicaciones en la industria automatizada. Las técnicas nucleares también se aplican para las mediciones de nivel y distancia, aunque para ello existen otros métodos.

Los instrumentos de medición de masa por unidad de superficie, también llamados sensores de espesor, son usados en la producción de material laminado. El principio físico está basado en la transmisión de radiactividad a través de la lámina, que es dependiente del espesor de la misma. En la industria del papel, el uso de los sensores de espesor es decisivo, sobre todo en sistemas de producción automática y de alta velocidad.

Los sensores de espesores son también aplicados en la industria del acero, lográndose con ello uniformidad en el laminado y ahorro de materia prima. En forma similar, en la industria del plástico los sensores de espesor se han aplicado con éxito.

Estas aplicaciones han sido potenciadas gracias al desarrollo de los microprocesadores que introducen la automatización en la producción.

Las técnicas nucleares han dado lugar a densitómetros basados en la absorción de radiación gamma, utilizados para medir la densidad de líquidos, sólidos o superficies acuosas espesas. Estas técnicas se aplican en la industria del petróleo, minería, alimentos. Permite, por ejemplo, garantizar la cantidad de tabaco en los cigarrillos, producidos en procesos automatizados.

La determinación y consiguiente control en la generación de sulfuro y nitrógeno producido en la industria del carbón resulta ser también útil en la optimización del proceso, que debe tomar en cuenta el medio ambiente. También se usan estas técnicas para controlar contenidos de ceniza y humedad del carbón y el coque.

La técnica de fluorescencia de rayos X, basada en la excitación con rayos gamma de muestras minerales puede ser usada en la cadena de producción. Ello permite alcanzar un rendimiento óptimo, determinando la composición del fango del mineral.

El revestimiento de metales con acero o estaño es controlado con métodos nucleares, lográndose ahorrar cantidades significativas de materia prima.

Para medir niveles se coloca una fuente y un detector en lados opuestos del depósito, que al llenarse hasta cierto nivel impide que pasen los rayos gamma. Estas son técnicas irremplazables cuando el medio es inaccesible.

Entre las aplicaciones más difundidas se tiene el control de niveles catalíticos en los reactores químicos del funcionamiento de columnas de fraccionamiento en las refinerías.

En la construcción de puentes de hormigón pretensado las aplicaciones radioisotópicas son valiosas para el control de su estructura interna. Las sondas neutrónicas, gracias a su capacidad de medir humedad, son cada vez

más difundidas en la industria del vidrio y hormigón.

Una de las aplicaciones recientes de las fuentes de neutrones es la detección de explosivos, gracias a que los neutrones activan el nitrógeno, y su radiación gamma es procesada por sistemas de detección nada sofisticados.

También se cuenta con técnicas para medir la densidad de suelos; humedad en suelos en áreas de construcciones. En la industria de la construcción se logra determinación del contenido de grasas en jamones, en carnes; medidas de densidad de productos envasados; determinación del espesor de la galleta en forma automática.

También se tiene el control de robos en el que intervienen las aplicaciones nucleares. En una compañía argentina que construía equipos de medición se comenzó a detectar pérdidas de ciertos elementos, principalmente mercurio y cobre. Por la gran afluencia de vehículos que entraban a la empresa era difícil detectar esta pérdida. La empresa pidió apoyo a la Comisión Nacional de Energía Atómica para poder determinar esta pérdida. La Comisión determinó que colocando un material radiactivo, en este caso fue plata 110, en forma de amalgama para el mercurio y nitrato de plata para el cobre, y usando un detector a la entrada o salida de los vehículos, o a la salida de personal, podía detectarse esta pérdida.

Entre las técnicas que requieren instrumentación se tiene las siguientes:

- La radiografía con rayos gamma o con rayos X, como una técnica no destructiva, es aplicada para verificar soldaduras, fundiciones, maquinaria ensamblada y en cerámicas. La aplicación más difundida es el control de soldaduras de tuberías.
- La autorradiografía, que usa la radiactividad emitida por el objeto de estudio, es utilizada en investigaciones biológicas y metalúrgicas. Un ejemplo de aplicación es la determinación de zonas de solidificación en el vaciado de acero.
- La neutrografía que se basa en la atenuación de un haz de neutrones por la materia. Esta técnica es muy útil para la detección de hidrógeno, cadmio y boro, debido a su fuerte atenuación. Se usa para detectar grietas en hojas de turbinas de gas y la corrosión de componentes de aviones, para control de calidad de cerámicas, para detectar cargas explosivas y lubricantes en caja de cambios o cojinetes.

- Detectores de humo, basados en la emisión de rayos por una fuente y la producción de corriente en una celda, que es interrumpida por la presencia de humo, absorbente de la radiación.
- Fuentes luminosas, con radioisótopos producidos artificialmente (por ejemplo tritio) y que no tienen el peligro del radio, usado en el pasado.
- Procesos industriales, gracias a la inducción de reacciones químicas por la radiactividad. La radiación produce, por ejemplo, endurecimiento de los revestimientos de superficies de madera. La radiación mejora las propiedades de aislantes como el cloruro de polivinilo. Otro ejemplo es la vulcanización de las hojas de caucho con radiaciones, en lugar de usar sulfuros.

Entre las perspectivas se piensa en la inmovilización radiológica de materiales bioactivos tales como drogas, enzimas, antígenos y anticuerpos en materiales polímeros.

- Los haces de neutrones sobre los gases de chimeneas permiten mejorar la calidad del aire y eliminar el problema de las lluvias ácidas, mediante la remoción del SO_2 y el NO_x , teniendo como subproducto fertilizante agrícola.

6.3 Ensayos no destructivos en el Perú

Los ensayos no destructivos en el Perú tuvieron su auge en el control de oleoductos con técnicas nucleares. Los componentes de esta técnica son la fuente, la radiación, el material y la película.

Si el material tiene una porosidad o una rajadura, entonces hay menos absorción y pasa más radiación, de tal manera que se produce una imagen latente más fuerte en la emulsión, después del revelado se logra una imagen más oscura, mayor ennegrecimiento, que nos indicará la presencia de una falla.

En el Perú también se tiene servicios de radiografía que usan un tubo de rayos X o un isótopo que produce los rayos gamma que son de naturaleza electromagnética, viajan a la velocidad de la luz. Lo que los diferencia es su origen; mientras que los rayos X son producidos electrónicamente, los rayos gamma son producidos por un radioisótopo. Hay muchas ventajas cuando

se utiliza la radiografía gamma. Es portátil, no necesita una fuente exterior de energía. El equipo de rayos X es pesado, delicado, para hacerlo andar requiere mucho cuidado, porque cualquier golpe lo destruye y la fuente de energía requiere un voltaje estable.

Los radioisótopos tienen su propia energía. La desventaja es que la radiación es permanente, no se puede cerrar con una llave como el caso de los rayos X, y se va perdiendo. Entre los principales radioisótopos que se utilizan en la radiografía industrial podemos mencionar el cobalto 60, que se utiliza para materiales de 2,5 cm hasta 20 cm de espesor. También se utiliza bastante el indio 192, para aceros que van desde unos 6 mm hasta unos 7 cm de espesor. El indio y el cobalto se consiguen fácilmente. No es el caso, por ejemplo, del talio que servía para materiales muy delgados. El talio hay que fabricarlo y tiene una vida tan corta que prácticamente es para uso inmediato. En el caso del iridio 192, que es el que tiene mayor actividad por gramo, se trata de un cilindro de 1,2 cm de largo por 1,2 mm de diámetro, con 100 curies de actividad. Esta pastilla va encerrada en un casquillo de material inoxidable y soldado de tal manera que no pueda perderse. El tamaño de la pastilla es de la punta de un bolígrafo común.

La película es similar a las fotográficas, que tiene una base de acetato, un plástico duro, está recubierto con una emulsión en base de bromuro de plata -que es sensible a la luz, a la radiación X y gamma- con una capa protectora. La película fotográfica viene en varias medidas. La sensibilidad depende del tamaño del grano.

El proceso de revelado consta de 3 partes: tenemos el revelado, el fijado y luego el enjuage. El revelado convierte los granos de bromuro de plata ionizada en plata metálica negra, formando ya una imagen visible. Luego viene un baño de parada que es el que hace que termine la acción del revelador y posteriormente pasa al fijador. El fijador remueve todo el bromuro de plata que no ha sido envuelto en plata metálica negra. Luego se seca la película, hay casos en los que se utiliza el revelador automático, en el cual la película se revela, se fija, se enjuaga, se seca y sale lista para su interpretación.

En el control industrial, el paso de la interpretación también es importante. Se debe determinar si una discontinuidad es un defecto.

Luego vienen los indicadores de calidad. Se trata de observar las imágenes de objetos conocidos y bien dimensionados, para tener una idea de cómo salen en la radiografía. Los factores que vienen en la imagen radiográfica son el contraste y la definición. El contraste es la diferencia entre un os-

oscurecimiento de un sector y otro sector. El oscurecimiento se debe a los defectos. Un puntito oscuro refleja una falta de material, una raya oscura indica una fisura. La definición es la separación entre zonas, ésta es la que nos va a dar el tamaño de la discontinuidad y nos permitirá decir si es un defecto. El contraste es debido al sujeto, a las diferencias de absorción en la muestra. La muestra tiene diversos materiales o diversos espesores, lo que produce contraste de una zona a otra.

Debe tomarse en cuenta las características de la radiación. Se utiliza cobalto 60 para un espesor muy pequeño. El iridio 192 se usa para un espesor mayor.

Respecto al tipo de películas, existen rápidas, lentas, medias. Si es rápida tendríamos poco contraste. Si es a alta temperatura, o no es el tiempo adecuado, o el revelador está muy usado o muy viejo, tampoco se tendrá una buena imagen. Por otro lado, tiene que ser un revelador activo. La densidad de la película debe estar de acuerdo a la cantidad de radiación que recibe.

La gammagrafía no reemplaza a otras técnicas (radiografía, ultrasonido, por ejemplo) sino que las complementa. Con equipos pequeños en gammagrafía podemos desplazarnos a ciertas zonas donde no se puede desplazar un equipo de radiografía o un equipo de ultrasonido, que son bastante grandes. En el caso del oleoducto Nor-Peruano, no se podía llevar un equipo de ultrasonido, pero se trasladó fácilmente un equipo de gammagrafía para el campo. El ultrasonido y radiografía son técnicas muy útiles y tienen sus ventajas. Con el ultrasonido prácticamente se puede hacer todo lo que se hace con radiografía, la desventaja reside en el hecho que se necesita una persona que trabaje, que esté completamente entrenada; que interprete la lectura *in situ*.

Con la radiografía se necesita una persona entrenada en tomar radiografías y que conozca el control de radioprotección y los peligros del uso de la radiación. Pero esa persona no necesita interpretar.

En ultrasonido se requiere un amplio entrenamiento. Para un oleoducto que recorre 800 km desde la Selva hasta Bayovar, se necesita mucha gente que trabaje. Con radiografía muchas personas hacen las tomas radiográficas y pocos las interpretan.

En el Perú se ha fundado la Sociedad de Ensayos No Destructivos¹ en

¹Esta sociedad era en cierta forma la culminación de varias etapas de desarrollo de los ensayos no destructivos. En 1982 se inició el Proyecto Regional de Ensayos No Destruc-

cuyo trabajo están involucradas varias instituciones del país, tanto de la industria privada como del Estado. En esta institución se ha trabajado en una norma de calificación y certificación de personal. En la primera etapa comenzó la capacitación, a través de expertos internacionales en Lima. Luego se realizaron cursos regionales. Los cursos nacionales fueron tomados por unas 3 000 personas. A partir de 1984 se dieron unos 10 cursos regionales por año. En esos cursos se prepararon unas 200 personas. En 1988 y 1989 se realizó la difusión de los END en universidades de todo el país, en la gran minería, Southern Peru y Centromín, Electroperú. En 1990 se iniciaron servicios para la industria, especialmente SIMA Industria Metal Mecánica.

tivos (END) para América Latina y del Caribe. En el Perú participaba el IPEN como entidad responsable del proyecto, y otras instituciones estatales y privadas: ITINTEC, PETROPERU, Universidad Católica, SIMA, Universidad San Marcos (Facultad de Metalurgia), Servicio de Mantenimiento de la Fuerza Aérea (SEMAM-FAP), Aeoperú, etc. El proyecto era patrocinado por el OIEA.

Chapter 7

Hidrología

7.1 Perspectivas de desabastecimiento de agua

El abastecimiento de agua es fundamental para la supervivencia de todo pueblo. Por ello, siempre se ha dado importancia a la evaluación, el abastecimiento y la renovación de recursos hídricos. Este trabajo se hace más urgente en la medida del crecimiento de la población mundial, la que está generando necesidades colosales de recursos hídricos.

Veamos algunos ejemplos del problema de escasez de agua en el mundo. En Egipto, a fines de siglo cada persona tendrá sólo las dos terceras partes del agua con que cuenta en la actualidad. En Kenya sólo se dispondrá de la mitad. Para el año 2000, seis de los siete países de Africa oriental y las cinco naciones de la costa meridional del Mediterráneo sufrirán escasez de agua. Los Estados Unidos tienen situaciones críticas en sus regiones áridas, lo mismo ocurre con Polonia e Israel. La escasez de agua también amenaza unas 50 ciudades de China, donde la tercera parte de los pozos están secos. En India, el número de aldeas con problemas de agua ha aumentado de 17 000 a 70 000 en los 20 últimos años.

En la ciudad de Lima, el año 1992 fue muy ilustrativo. Un desequilibrio climatológico produjo una carencia de lluvias, obligando a un racionamiento de agua y -por la dependencia casi exclusiva de la hidroelectricidad- a una drástica merma en la generación eléctrica, dando lugar a cuantiosas pérdidas económicas en los diversos sectores de la producción.

Como puede verse, la hidrología es una actividad de alta prioridad en todo el mundo, pero especialmente en lugares con escasos recursos hídricos,

como es el caso de la ciudad de Lima.

Las técnicas nucleares, que usan radioisótopos e instrumentos para medir núcleos radiactivos y estables, han permitido resolver una serie de problemas en hidrología. Ello ha llevado a la formación de grupos especializados en el tema, con el apoyo de los organismos internacionales.

En la prospección de agua subterránea, con técnicas nucleares se obtiene información sobre origen, edad, distribución, calidad, presencia y mecanismo de recarga, interconexiones entre los cuerpos de agua subterránea, etc.

Respecto a las aguas superficiales, se estudia la dinámica de los lagos y embalses, filtración de represas, filtración en los conductos subterráneos, medición de la descarga de los ríos, transporte de sedimentos suspendidos y de sedimentos de fondo, tasa de sedimentación, datos sobre litología, porosidad y permeabilidad de acuíferos. Las técnicas nucleares usan isótopos estables y ambientales para las aplicaciones hidrológicas, dando lugar a la llamada hidrología isotópica.

Los trazadores isotópicos radiactivos o estables que se encuentran en el agua son óptimos para el estudio hidrológico.

En tal sentido, el hidrógeno y el oxígeno son elementos valiosos para obtener información hidrológica. Estos tienen ventaja sobre los colorantes, los que se pierden por adsorción o reacción química con componentes disueltos.

Para los fines hidrológicos se requiere instrumentación para la medición del contenido de tritio (hidrógeno 3), carbono 14, relación entre isótopos estables deuterio y oxígeno 18 en el agua y el carbono 13 en el dióxido de carbono, mediante espectrometría de masas; en análisis químico de los principales iones traza contenidos en el agua; así como la conductividad y el pH.

Dada la importancia del problema hidrológico, el OIEA cuenta con un laboratorio especializado en hidrología isotópica, ubicado en Viena, el que está al servicio de los países miembros de las Naciones Unidas.

7.2 Aguas subterráneas

Para apreciar la utilidad de los estudios isotópicos en hidrología, tomemos algunos ejemplos de aplicación en aguas subterráneas.

La edad del agua es un dato importante para su explotación. Por ejemplo, si el agua del subsuelo de una región tiene 20 000 años significa que no se

recarga, que no tiene contacto con otras regiones, por lo que se agotará por la explotación. Este dato sería suficiente para no realizar obras en lugares que no tienen recarga de agua, puesto que el agotamiento del agua condenaría el proyecto al fracaso. Pensemos, por ejemplo, las pérdidas de una eventual construcción de un complejo industrial en un lugar con recursos agotables de agua o la construcción de un costoso túnel para extraer agua de una cordillera que contiene agua fósil.

Para determinar si existe recarga y determinar su mecanismo se suele medir la concentración de tritio. En el desierto de Kalahari, Bostwana, se descubrió que la concentración de tritio era similar a la que tenía la escasa lluvia de la región, demostrándose entonces que la recarga era rápida.

En la zona costera de Veracruz, las precipitaciones son abundantes, pero la evaporación intensa las contrarresta. Un estudio realizado por la organización nacional de agua de México y el OIEA, con mediciones isotópicas, demostró que había recarga por infiltración de las precipitaciones locales. También se estimó las pérdidas por infiltración de un río que atraviesa la llanura costera.

Con técnicas nucleares se estudió el acuífero aluvial del valle de Sébaco, cruzado por muchos ríos y rodeado por montañas de rocas volcánicas. Los datos obtenidos dieron una idea completa de la dinámica acuífera del valle. Se determinaron los flujos de agua, edad del agua subterránea, y que no había recarga por infiltración de las precipitaciones locales.

El estudio hidrológico da informaciones para determinar la viabilidad de grandes proyectos. Un ejemplo es el proyecto de construcción de una represa en el norte del Ecuador cuyo objetivo es aumentar la capacidad de un lago. Era necesario conocer las pérdidas por filtración del agua y el aumento de esa filtración por presión del agua de la represa.

El estudio determinó la presencia de una capa de arcilla, una capa arenosa, y que el lago no contribuye a la recarga de la capa arenosa. El acuífero arenoso tenía un aporte de las precipitaciones entre 1970 y 1985. Existía un flujo vertical y diferentes permeabilidades, que producían diferentes velocidades del agua.

Como resultado del estudio se vió que no era recomendable la construcción de una represa en el lugar, donde podía producirse pérdidas por filtración.

7.3 Hidrología isotópica en el Perú

La hidrología isotópica consiste en determinar la composición isotópica del agua para deducir su origen y su edad. Para ello se mide la desviación del oxígeno y deuterio. Se usa también trazadores para determinar filtraciones en el el subsuelo.

Con esa técnica se ha obtenido indicios de que el agua que brota del túnel Graton, de la cuenca del Rímac, contiene componentes provenientes de la cuenca del Mantaro.

El grupo de hidrología isotópica del IPEN¹ ha realizado también estudios de afianzamientos hídricos del río Cañete, donde ELECTROPERU planea construir una central hidroeléctrica.

Asimismo se realiza un estudio hidrológico del embalse “Pasto Grande”, el que servirá para proyectos hidroeléctricos y acuíferos.

7.4 Agua para Lima

Hace más de dos mil años, Lima estaba poblada y abastecida de agua suficiente para las comunidades locales. El incremento de la población y la construcción de ciudadelas, como Pachacamac, por ejemplo, fueron respaldados por sistemas de acueductos que traían las aguas a los centros más importantes del valle.

En 1535, los españoles irrumpieron en la vida de esta región, fundando la ciudad de Lima, en la Plaza de Armas, a la que llega el agua 43 años después.

En 1857 se realizó la primera conexión domiciliaria. En 1917 se inauguraron 3 km de galerías filtrantes en Cacahuasi (Atarjea), y su sistema de abastecimiento de agua potable, utilizando por primera vez aguas superficiales.

En 1930, Lima contaba con 341 720 habitantes que consumían 1,16 m³/s, para los cuales se construyó 200 km de tuberías, un sistema de almacenamiento de 30 millones de litros de agua. En 1950, P. Boner presenta el proyecto de la represa de Yuracmayo, la que fue diseñada en 1966.

S. Antúnez de Mayolo recomienda (1950) la desviación por gravedad de las aguas del río Mantaro. Luego, en 1970, se sugiere el represamiento de

¹El grupo de hidrología isotópica del IPEN está conformado por R. Rojas, G. Arroyo, C. Castillo y C. Maguiña

Tomaycalla (ríos Chancay y Chillón), el que recibiría aguas de los ríos Jicamarca, Rímac, Manchay con las del Lurín. En 1980 una empresa extranjera recomienda el trasvase del Mantaro por impulsión y perforación de pozos.

Desde 1985 se comienza a observar descenso en la producción del sistema de abastecimiento de agua de Lima, acentuándose el problema en 1993 debido a sequías. Un severo racionamiento de agua se implanta en la ciudad, la que aumenta su demanda a 24,8 m³/s, con sus 7 millones de habitantes -según estimaciones del censo de ese año.

Las perspectivas para el año 2 000 son oscuras, haciéndose cada vez más urgente una solución integral. Ante ello, diversos grupos de profesionales y empresas han propuesto soluciones que van desde optimizar el sistema de abastecimiento existente hasta la construcción de un trasvase de aguas del Mantaro. G. Flores² sugiere realizar un túnel en los orígenes del río Chillón, en la cordillera La Viuda.

En cualquiera de las soluciones propuestas se necesita un estudio de los recursos hídricos de la región, que nos permita seleccionar técnicamente la alternativa más adecuada.

7.5 Análisis isotópico del acuífero de Lima

En el marco de un proyecto de cooperación entre el IPEN, SEDAPAL y el OIEA, se inició hace dos años un estudio orientado a ampliar el conocimiento del mecanismo de recarga del acuífero y de los ríos Rímac y Chillón en la parte alta de sus cuencas, mediante el uso de técnicas isotópicas, cuyos resultados se espera contribuyan en la elaboración y ejecución de proyectos de abastecimiento de agua para la ciudad de Lima. Estos estudios se proyectan continuar y extender a otras áreas de interés del territorio nacional, en función de los requerimientos y las posibilidades de cooperación de las instituciones vinculadas a la evaluación y/o manejo de recursos hídricos³.

Lima, con 7 millones de habitantes, se abastece de aguas superficiales del río Rímac y de aguas subterráneas del acuífero de Lima, alimentadas por la infiltración de los ríos Rímac y Chillón.

²Encuentro Problemática del Agua: Alternativas y Soluciones, Lima 17 y 18 de agosto de 1993, organizado por la Asociación Peruana para el Desarrollo Tecnológico

³El equipo de investigadores está conformado por A. Plata (OIEA), R. Rojas (IPEN), J.C. Ruiz (SEDAPAL), y C. Sebastián (IPEN).

La demanda actual de agua para uso doméstico e industrial es del orden de $24,8 \text{ m}^3/\text{s}$, de los cuales $13,1 \text{ m}^3/\text{s}$ son abastecidos por aguas superficiales y corresponden a la capacidad de tratamiento de la planta de la Atarjea. La diferencia se abastece de aguas subterráneas. El paulatino abatimiento de la napa freática que se observa en todo el acuífero indica la sobreexplotación a que está sometido, y es el origen del desabastecimiento de agua que sufren diversos puntos de la ciudad.

Los resultados de los estudios permiten dividir el acuífero en seis sectores, en función al área de influencia de los ríos Rímac y Chillón y a la presencia de aguas evaporadas que se ha podido detectar en los sectores de La Molina y Chorrillos.

Estos resultados comparados con los de aguas superficiales de los ríos Rímac y Chillón confirman que el origen de la recarga del acuífero es la infiltración de estos mismos ríos.

Por otro lado, recientemente R. Rojas ⁴ ha mencionado que el bajo contenido de tritio del agua de los pozos de Lima indican que se trata de agua fósil, no renovable, oscureciendo aún más las perspectivas de desabastecimiento de Lima.

7.6 El providencial túnel Graton

El año 1992 hubo escasez de lluvias en la cuenca del Rímac y el Mantaro, que generó un desprovisionamiento de agua y de energía eléctrica en Lima. La catástrofe iba ser completa de no ser por la existencia del túnel Graton que llegó a proporcionar la mitad del caudal del río Rímac. Ello aumentó la importancia de los estudios hidrológicos que se llevaban a cabo en torno al mencionado túnel.

El túnel Graton fue construido como sistema de desagüe de las minas de Casapalca, y parte de la cota 3 200 y tiene una longitud aproximada de 11 km. Está constituido por dos túneles paralelos, uno para desagüe y otro para mantenimiento.

Desde su puesta en servicio, el año 1962, viene drenando un caudal que varía entre 4 y $6,5 \text{ m}^3/\text{s}$, aproximadamente. La constancia del caudal indica que debe haber varias fuentes para alimentar de agua el túnel.

⁴*II Seminario sobre Tecnología Nuclear*, 20 - 24 de setiembre de 1993, organizado por el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) y la Sociedad Peruana de Física (SOPERFI)

El estudio del origen de las aguas del túnel Graton permitiría determinar la forma cómo aumentar el caudal del Rímac, vital para la población de Lima. De ser posible, ello significaría perforaciones de galerías en lugares a determinarse.

Los resultados preliminares sobre los isótopos estables obtenidos hasta ahora por A. Plata et al.⁵ demuestran la independencia de origen del agua que drena del Graton y las lagunas de la región a cotas más elevadas que el túnel Graton. J. C. Ruiz sugirió que el origen de las aguas del túnel puede estar tanto en la cuenca del río Blanco como en la cuenca del río San Mateo. La hipótesis de la cuenca del río Blanco como origen de las aguas del túnel Graton parecía estar reforzada por la existencia de una falla paralela al río Blanco. El estudio más detallado de esta hipótesis es de suma importancia, porque se estaría proyectando construir el embalse de Yuracmayo, situado en la cabecera del río Blanco. Además, el túnel Graton es atravesado por otras fallas que alimentan su caudal. A 500 metros de la boca del túnel aflora agua, en relación con una falla, proporcionando un caudal de 0,6 m³/s. A 2,2 km se encuentra otro afloramiento, esta vez de 2 m³/s. El último gran afloramiento, drena el 40 % del caudal.

7.7 Trazadores artificiales

Para estudiar estas hipótesis se usaron los trazadores artificiales, como la rodamina, inyectándose a 7,5 km de distancia aguas arriba de la desembocadura del río Blanco. Las muestras fueron luego tomadas en el puente de la carretera Lima-La Oroya sobre el río Rímac.

Luego se inyectó rodamina a unos 500 metros aguas abajo de la presa en construcción de Yuracmayo. Las muestras se recogieron en la estación de aforo de SENAMHI, a 1 km aguas arriba de la desembocadura en el río Rímac.

De los resultados de esas mediciones se pudo concluir que el río Rímac y el río Blanco, en las áreas medidas, no contribuyen con el caudal del túnel Graton. Este resultado es alentador para el proyecto de Yuracmayo, puesto que por lo menos el agua que sale por el Graton no viene del embalse de Yuracmayo.

⁵A. Plata, R. Rojas y J.C. Ruiz, *Informe de avance, OIEA*, marzo 1993

7.8 Análisis isotópico

Debido al proceso de evaporación que llevó el agua desde el mar hasta las zonas de lluvia, la composición isotópica de las aguas continentales depende de la historia del agua antes de la precipitación. En su trayecto, la nube va perdiendo agua por condensaciones hasta que pierde su actividad. Las moléculas pesadas, HDO y H_2^{18}O , van dejando la nube, la que va empobreciéndose de éstas. Por otro lado, la composición isotópica de las precipitaciones depende de la temperatura media de la atmósfera a nivel del suelo.

Hay, en realidad, otros factores que influyen en la composición isotópica, entre los cuales podemos mencionar el intercambio isotópico con el vapor atmosférico previamente existente, la evaporación parcial de las gotas de agua durante su caída al suelo. Otro factor muy importante es el llamado efecto de altitud, debido a la mayor velocidad de difusión de las moléculas ligeras en atmósfera durante el ascenso de las nubes y el aumento de la condensación por disminución de la temperatura.

La composición isotópica puede también modificarse durante el proceso de infiltración como consecuencia de evaporación parcial.

La composición isotópica del agua de mar es uniforme, pudiendo presentar variaciones en regiones pequeñas, debido a la acumulación de aguas continentales o al efecto de evaporación.

La evaporación del agua de mar, para luego formar nubes y condensarse, conlleva fenómenos de fraccionamiento isotópico de las moléculas existentes en el agua.

A mayor altura, menos pesados serán los isótopos de agua de lluvia. En consecuencia, la medición de los isótopos de hidrógeno y oxígeno en el agua nos da información sobre las posibles zonas de dónde viene el agua.

Los resultados sugieren que el agua del Graton, que se encuentra a unos 2 500 m, provendría de precipitaciones a una cota media de 4 500 m. Mientras que las aguas del río Rímac en Matucana y Chosica podrían proceder de precipitaciones de cota media de alrededor de 3 000 m.

Por otro lado, los dos manantiales de Matucana tienen una composición isotópica similar a la del río Rímac, sugiriendo que tienen el mismo origen.

El tritio generado en las explosiones termonucleares de los años 60 fue integrado a las precipitaciones de esas épocas, por lo que su presencia en las aguas subterráneas da indicaciones de su antigüedad, tomando como

referencia la composición del agua de los ríos Rímac y Blanco que se suponen de origen reciente. Las concentraciones menores de tritio indicarían mayor antigüedad. Con estas consideraciones, los resultados sobre las mediciones de tritio indican que los dos primeros afloramientos, a 0,5 y 2,5 km, son de agua reciente, mientras que las aguas que afloran más al fondo son más antiguas. El tiempo de renovación de las aguas del Graton sería unos 80 años.

La composición de ^{13}C indica la procedencia biogénica del carbono y no simplemente de la formación rocosa. La concentración de ^{14}C está de acuerdo con la hipótesis de una simple disolución de materiales carbonatados, por efectos del CO_2 disuelto por el agua en el momento de su infiltración.

7.9 Hidrología en proyecto Pasto Grande

A. Plata (OIEA) et al. han realizado estudios sobre la zona del altiplano de Moquegua, incluida en el Proyecto Pasto Grande y fugas de agua en el embalse construido para contrarrestarlas⁶.

El proyecto Pasto Grande tiene por objetivo captar recursos hídricos con fines agrícolas, de producción de energía y consumo por las poblaciones de Moquegua e Ilo. Se ha construido el embalse de Pasto Grande sobre el río Vizcachas, el embalse Humalso y un acueducto de unos 80 km, el túnel Ojetire y el túnel Jachacuesta.

El estudio de la presa Pasto Grande fue comenzado a raíz de las pequeñas pérdidas que presentaba, con diversas filtraciones que emergen en diversos puntos aguas abajo de la misma.

Los resultados de las mediciones realizadas en la campaña de octubre de 1992, muestran que los caudales que afloran aguas abajo de la presa de Pasto Grande proceden en gran parte de fuentes subterráneas locales. Las filtraciones provenientes del embalse ascendían a 1,3 litros por segundo. Debido a la poca filtración del embalse, no se justifica la inversión en la impermeabilización de los materiales a través de los cuales se filtra el agua.

Recientemente G. Arroyo⁷ mostró que hay pequeñas fugas del embalse de Pasto Grande.

⁶A. Plata, R. Rojas y J. Romero, *Informe de avance*, OIEA, marzo 1993.

⁷G. Arroyo, *II Seminario sobre Tecnología Nuclear*, Lima, 20-24 de setiembre de 1993, organizado por el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) y la Sociedad Peruana de Física (SOPERFI)

También se ha estudiado la separación de acuíferos en la region del altiplano de Moquegua. De los resultados se deduce que las aguas subterráneas en el área estudiada del altiplano de Moquegua se distribuyen en varios acuíferos independientes y con poca recarga. De los análisis de tritio se estima que las aguas tienen más de 40 años de edad.

Los acuíferos identificados son: 1) zona donde se ubican los manantiales de Copapujo e Incalacayac, 2) zona que recarga los manantiales de cabecera del río Chilota, 3) zona de la pampa de Humalso y 4) valle de Carumas.

7-A Apéndice

Isótopos estables del agua

El agua natural está conformada por isótopos del hidrógeno ^1H y ^2H o deuterio y del oxígeno ^{16}O , ^{17}O y ^{18}O . Las proporciones significativas en el agua de mar son las siguientes:

$^1\text{H}_2^{16}\text{O}$,	997,680 partes por millón
$^1\text{HD}^{16}\text{O}$,	320 partes por millón
$^1\text{H}_2^{18}\text{O}$,	2,000 partes por millón

La relación isotópica está definida por la expresión:

$$r = \frac{\text{Número de moléculas del tipo } ^1\text{D}^{16}\text{O} \text{ (ó } ^1\text{H}_2^{18}\text{O})}{\text{número de moléculas del tipo } ^1\text{H}_2^{16}\text{O}} \quad (7.1)$$

La relación isotópica del agua en un determinado lugar depende de historia hidrológica de la muestra. Para expresar esa composición se define la desviación isotópica, respecto al patrón medio del agua de mar, conocido como SMOW (*Standard Mean Ocean Water*):

$$\delta(\%) = \frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{SMOW}}}{R_{\text{SMOW}}} \times 10^2 \quad (7.2)$$

Un δ positivo indica una mayor concentración del isótopo pesado (D u ^{18}O , respecto a la concentración del SMOW).

Chapter 8

Ciencias de la Tierra

8.1 Historia de la Tierra

El origen del universo es uno de los temas que causa mayor apasionamiento en las discusiones de científicos, y cada vez más, en todas las esferas de la sociedad. Pero si el tema del origen de universo genera debates, el de la formación de la Tierra, como paso intermedio al origen de la vida, es aún más controvertido. Tratando de apartarnos de los debates, nuestro interés está en la interpretación científica de la formación de la Tierra, basada en la observación y la investigación de huellas del pasado lejano, en el que la Tierra tenía un aspecto radicalmente diferente al actual, hospitalario y con amplias posibilidades de desarrollo de la vida.

El sistema Solar se formó por condensación de una nube protosolar, en la que el polvo y el gas espaciales se fueron conglomerando por efecto de la fuerza gravitacional. La fuerza de gravitación atrae los cuerpos entre sí, con una intensidad que aumenta cuando la distancia disminuye. De modo que el movimiento que contrae a la nube protosolar comienza lentamente y va acelerándose hasta llegar a la formación de cuerpos compactos, cuya historia dependerá del tamaño de esos cuerpos.

Es posible que la formación de la Tierra haya ocurrido en dos tiempos. Primero formando innumerables asteroides, para luego aglomerarse en planetas. Hasta ahora existen miles de asteroides en el sistema planetario Solar, entre Tierra y Marte. Muchos de los meteoritos que observamos caer a la Tierra son examinados minuciosamente por los rastreadores del pasado cósmico.

En todos los escenarios posibles, que se construyen a partir de los resultados de las investigaciones, se ve al principio una Tierra esférica a una temperatura de 1500 C. ¿De dónde vino el calor para calentar tanto esa esfera formada de polvo y gas fríos?: de la transformación en calor del movimiento de todas las partes iniciales que se fueron juntando poco a poco. Todo movimiento es signo de energía, y la energía se transforma en calor.

En la esfera caliente que hoy se llama Tierra no había entonces ni continentes, ni océanos. Más aún, el planeta era bombardeado constantemente por meteoros, presentando entonces un aspecto poco atractivo y ajeno a la vida que hoy conocemos.

La Tierra era entonces una esfera incandescente, que irradiaba calor hacia el espacio. Ello la lleva a enfriarse poco a poco, en un millón de años, dando lugar a la solidificación de los materiales.

Así comienza la segunda fase, llamada de diferenciación. En ese entonces, existía mucho material radiactivo con diversos períodos de decaimiento. La radiactividad natural de la Tierra de esa época provocaba un calentamiento en la esfera terrestre. Aquí se establece la diferenciación de dos zonas del globo. La corteza terrestre, que se enfría por radiación al espacio, y el centro que emite radiación que calienta la Tierra.

La competencia en la emisión de calor y la absorción de radiación hace que la evolución de los cuerpos así formados dependa de su tamaño. Tomemos el caso de una esfera de 1 km de radio y otra de 1 000 km. El interior de la esfera grande generará mil millones más de calor (proporcional al volumen o cubo del radio) y perderá un millón de veces más de calor (proporcional a la superficie o cuadrado del radio) que la esfera pequeña. Haciendo el balance, la esfera grande terminará más caliente que la esfera pequeña.

Es entonces explicable el hecho de que los asteroides que se encuentran entre Marte y Júpiter sean fríos y mantengan la estructura de su formación inicial y que, en cambio, los grandes planetas se solidificaran y fundieran varias veces. La Tierra misma es caliente en el interior, lo que algunas veces se hace evidente con las erupciones volcánicas. Pero la Tierra ha sufrido un proceso de sucesivos enfriamientos y calentamientos, cambiando su composición y formando capas. Así, la Tierra llegó a formar un núcleo de fierro y de níquel, conformado por una parte interna sólida y una parte externa líquida. El núcleo es cubierto por el manto, compuesto por silicatos de aluminio y magnesio.

Envolviendo la esfera se tiene la corteza, la que es de un espesor pequeño,

que va desde algunos km hasta 50 km. Es precisamente en esta corteza que se encuentran los continentes.

La primera era de la historia de la Tierra, llamada precambriana, abarca 4 mil millones de años, es decir casi la totalidad de su historia, la que tiene unos 4,550 millones de años. El período precambriano ha visto nacer los continentes y las formas de vida primitiva. Todo ello engloba muchos cambios en la estructura de nuestro planeta.

Al final, el interior de la esfera estaba caliente y la corteza fría. No es fácil deducir con precisión los eventos que ocurrieron en la Tierra. Los datos vienen de una delgada corteza terrestre. Los océanos más profundos llegan hasta cerca de 10 000 metros, lo que ya es difícil de alcanzar. Las perforaciones más profundas, correspondientes a la búsqueda de petróleo, llegan sólo a unos miles de metros. Eso significa que tenemos datos sobre una pequeña parte del globo terráqueo. Pero, los datos también provienen de eventos geológicos como los temblores y las erupciones volcánicas.

Una ayuda insustituible en el estudio geológico son las computadoras, las que permiten probar una serie de hipótesis sobre la evolución de nuestro planeta.

La investigación sobre la formación de los planetas habría sido más fácil si se hubiese estudiado sistemas planetarios como el nuestro. Ello no ha sido posible porque los sistemas planetarios que pudieran encontrarse en las cercanías cósmicas no emiten tanta energía como para observarlos, como sí lo hacen las estrellas lejanas. Así, limitados a la pequeña Tierra, se sigue batallando por mejorar nuestra visión sobre la historia del planeta. Las trazas del pasado terrestre se encuentran en las muestras geológicas, pero son muy escasas en lo que corresponde a los primeros mil millones de años. Los materiales radiactivos que se mantienen activos desde esa época son el rubidio 87, que se transforma naturalmente en estroncio 87, y los isótopos 235 y 238 del uranio, 232 del torio, 207, 206 y 208 del plomo. En base a las composiciones de esos isótopos en las rocas, se puede reconstituir una parte importante de la historia de la Tierra.

Sólo 4% de la superficie terrestre tiene más de 3 mil millones de años. Se han encontrado rocas de 3,8 mil millones de años en la costa occidental de Groenlandia, sobre la costa canadiense del Labrador. Estas rocas se han mantenido casi inalteradas desde esos tiempos. No queda nada de lo que había en la superficie terrestre los primeros 750 millones de años. La corteza terrestre formada al principio encerraba materia fundida. Esta

corteza inestable sufría entonces de un volcanismo intenso, y de un bombardeo continuo de meteoros. En forma permanente se abrían agujeros en la corteza, por donde salía materia fundida que cubría entonces la superficie, formándose nuevas regiones.

Poco a poco, el ambiente se va calmando, dando lugar después a los continentes actuales. Los continentes son bloques transportados por la llamada placa continental, que se desplaza sobre el manto.

El movimiento de placas puede hacer nacer o desaparecer continentes. En ese constante cambio se realiza un reciclaje de material. Por ejemplo, una placa oceánica puede penetrar bajo una placa continental para introducirse en el manto. De forma similar, se ha producido un permanente reciclaje en el que los elementos se fueron diferenciando, de modo que los elementos químicos de la superficie no se encontraban distribuidos en la forma cómo lo están ahora en el núcleo, manto y corteza.

8.2 Agua y aire

El universo está formado por 90 % de hidrógeno, 9 % de helio y 1% del resto. El helio es inerte y no se combina con otros elementos, mientras que el hidrógeno da lugar a una gran variedad de compuestos químicos. Desde el principio de la Tierra, los gases de hidrógeno y helio, por ser livianos, formaron la parte exterior del planeta. Estos gases, por la poca atracción de la Tierra, han abandonado el planeta. Hasta ahora la Tierra pierde hidrógeno y helio de las capas exteriores de la atmósfera que sufre bombardeo cósmico.

De esa forma, la Tierra fue quedándose envuelta con gases pesados, como los que hoy se encuentran en Marte y Venus. La composición probable de la atmósfera primitiva sería metano CH_4 , gas amoníaco, hidrógeno sulfurado SH_2 , gas carbónico CO_2 , un poco de nitrógeno y agua. Actualmente se tiene en la atmósfera 79% de nitrógeno, 20 % de oxígeno y 1 % de argón.

La temperatura de la Tierra provocaba la vaporización del agua. Poco a poco fue disminuyendo la temperatura, formándose océanos que hervían y daban lugar a un diluvio permanente. Luego se fueron formando ríos y glaciares. En esta hidrosfera, que también la compone el vapor de gas, se desarrolló el ciclo del agua.

En la atmósfera primitiva, los movimientos del agua y los procesos físico-químicos dieron lugar a innumerables compuestos químicos complejos.

Después de miles de millones de años se formó la composición actual de la atmósfera terrestre. Los gases primitivos partieron de la influencia de la Tierra, y la atmósfera se llenó de los gases que salieron del manto. Los volcanes emiten agua, nitrógeno, gas carbónico. Esos gases se condensaron para integrarse a los océanos. Actualmente, las plantas, por su parte, transforman el gas carbónico en oxígeno y en carbono que asimilan. Por ello es que hay poco gas carbónico en la atmósfera.

Pero al principio, cuando no había plantas, el gas carbónico se disolvió en los océanos, combinándose con óxidos para formar carbonatos.

De los gases liberados queda el nitrógeno que forma el 79% de la atmósfera. El oxígeno se formó hace 2,6 mil millones de años, gracias a la vegetación. El argón, el 1% de la atmósfera, proviene de la desintegración del potasio 40. El potasio 40 sigue existiendo después de 4,55 mil millones de años, debido a su período de 1,3 mil millones de años.

Así, la Tierra tomó la forma que conocemos hoy día. Los continentes, océanos con mucha agua y la atmósfera compuesta casi enteramente de nitrógeno. De allí tendrá que salir la vida que hoy trata de comprender el planeta que le sirvió de cuna.

8.3 Los sismos

Los más grandes temores de los hombres surgen ante eventuales desastres naturales que se producen sin previo aviso. Los terremotos que nos encuentran durmiendo o en lugares de difícil evacuación son los que más daño causan. Por ello, los científicos han tratado de elaborar métodos para predecir catástrofes o eventos naturales que puedan tener consecuencias negativas si llegan abruptamente.

En ese aspecto se ha logrado algunos avances importantes. En sismología, por ejemplo, se ha establecido un método no sólo para predecir sismos, sino su magnitud y su posición a decenas de kilómetros. Este método se basa en la propiedad de algunas rocas de emitir señales electromagnéticas ante la compresión de las mismas.

Uno de los mayores logros de la física es su capacidad de predecir fenómenos, a partir de teorías científicas que explican el comportamiento de la materia y la energía. Así, lo que antes aparecía como una manifestación sobrenatural, como los eclipses, se pudo explicar y luego predecir con años de anticipación. Lo mismo ocurre con el cometa Halley, que se puede seguir día

a día y comprobar su trayectoria calculada gracias a la teoría de gravedad. Esta teoría es muy simple y las ecuaciones a las que da lugar tienen pocas variables. Pero existen otros fenómenos más difíciles de estudiar porque implican muchas variables, aunque en algunos casos se logra establecer manifestaciones previas. Este es el caso de los sismos.

Mucho se ha dicho de manifestaciones presísmicas. Se puede contar una variedad que va desde ladridos de perros, malestar y sueños de gente “sensible”, recepciones intensas de señales radioeléctricas parásitas, resplandores en el cielo, etc.

En 1982, el radiastrónomo J.W. Warwick estableció una relación entre un ruido radioeléctrico misterioso, observado simultáneamente por cuatro radiotelescopios norteamericanos en la frecuencia de 18 megahertzios. El insólito ruido duró diez minutos y se produjo a seis días de los terremotos que sufriera Chile en mayo de 1960.

Warwick explicó el fenómeno como causado por señales electromagnéticas de rocas sometidas a intensas compresiones. Ello lo comprobó en el laboratorio, detectando las señales emitidas por muestras de granito comprimidas con una prensa hidráulica. Las observaciones de Warwick fueron repetidas por el físico G.A. Sobolev, en 1983, en grandes bloques de granito usando una prensa de 50 000 toneladas.

Esta experiencia fue usada por los físicos griegos P. Varotsos, K. Alexopoulos y K. Nomikos, de la Universidad de Atenas, para establecer una red de detectores de señales electromagnéticas en Grecia con el objetivo de predecir sismos.

En 1983, en Grecia, se predijo 23 sismos de magnitudes superiores a 5 grados en la escala de Richter con una exactitud notable en 21 de ellos. La predicción se refería a la posición a decenas de kilómetros y a la magnitud con una aproximación de 0,5 grados. El éxito produjo reacciones positivas en organismos nacionales e internacionales.

Este método se está perfeccionando y comprendiéndose mejor. Los físicos del mundo entero están iniciando estudios similares.

El método puede aplicarse a regiones donde los centros sísmicos se encuentren en la superficie quebradiza como en Yugoslavia, Albania, Turquía occidental, Albania, entre otros. También se piensa que puede aplicarse en regiones continentales en las que el surgimiento de placas tectónicas provoque epicentros en la superficie como es el caso de los Andes, América Central, Zagros.

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) ha iniciado algunos trabajos sobre predicción de sismos, los que tendrá que intensificar debido a la gran sismicidad de nuestro suelo.

8.4 Riesgos volcánicos de la región de Arequipa

El 2 de julio de 1992, la Sociedad Peruana de Física (SOPERFI), sobre la base de reuniones técnicas con el geólogo británico Richard Oliver y de especialistas peruanos, alertó sobre la necesidad de vigilar los volcanes de la región arequipeña que muestran signos de reactivación.

Los riesgos volcánicos en la región arequipeña son reales. Es más, el gobierno regional de Arequipa declaró la región como zona de catástrofes.

Por ello es necesario que se apoye al IGP en sus funciones de estudiar los riesgos geológicos y sísmicos en esa región y en otras que se encuentran en situaciones similares. El Sabancaya, el Ampato y el Hualca Hualca, forman parte del complejo volcánico noroeste de Arequipa. A partir del año 1986 se nota un aumento de la actividad fumarólica, conocida desde hace siglos. A partir de fines de mayo de 1990 existen signos de reactivación, emitiendo columnas de cenizas que se elevan hasta 5 000 metros y se dispersan en un diámetro de 10 km. Se ha constatado emisiones violentas de bloques de 50 cm de diámetro que alcanzaron una altura de 500 metros.

El año 1990 aumentó la sismicidad, lo que significó decenas de eventos diarios con intensidad de 1,5 a 2 en la escala de Richter. El 5 de octubre de ese año hubo un temblor de 3 horas, seguido de otros menos largos.

Los riesgos para la población no son sólo sísmicos. Las cenizas dispersadas son ácidas y constituyen un peligro a unos 10 km a la redonda. La actividad puede afectar los sistemas de agua e irrigación del valle del Colca.

Existe también riesgos de desprendimientos de glaciares sucios por fusión, los que podrían alcanzar velocidades de 15 a 40 metros por segundo, similares al ocurrido en el Nevado del Ruiz, de Colombia, en la catástrofe de 1985.

En relación a las posibilidades de erupción del Sabancaya, hay tres eventuales escenarios: un súbito cese de la actividad, un incremento importante durante semanas y una evolución hacia el paroxismo eruptivo.

Un paroxismo eruptivo sería precedido de una transición de horas o días. Para detectar signos pre-eruptivos se necesita mediciones. Entre estos signos se tiene la deformación del cono volcánico, incremento de explosiones y

sismos, perturbación de la composición y flujo de aguas subterráneas, incremento de la emisión de gases y fumarolas en el suelo.

Ante estos riesgos, hay que asegurar la observación permanente del volcán y una comunicación con Arequipa en caso de peligro.

Para un seguimiento serio de la actividad volcánica se necesitan otros sismógrafos, mediciones de inclinometría, gravimetría, análisis de aguas y gases, análisis de los depósitos eruptivos y la utilización de imágenes satélite.

Debido a las cenizas hay que realizar estudios epidemiológicos y vigilancia toxicológica de la población. Es necesario también diseñar operaciones de evacuación para cada esquema de evolución del Sabancaya.

8.5 Datación de rocas volcánicas

El año 1988, en el C.N. "RACSO" de Huarangal, se formó un equipo dedicado a la datación de rocas volcánicas, por el método de huellas de fisión¹.

La técnica de huellas de fisión se desarrolló durante los años 60, la que se aplicó a la datación de material geológico y arqueológico².

Una traza de fisión se forma cuando un núcleo fisiónable (p.e. uranio 238) se fracciona en dos núcleos ligeros de aproximadamente igual masa, liberando cerca de 200 MeV de energía, y provocando el retroceso de los fragmentos en direcciones opuestas. Estos fragmentos de fisión rompen el balance electrónico de los átomos del sólido que se encuentren en su trayecto, dando lugar a huellas que se hacen visibles por microscopio óptico mediante un proceso de grabado con un reactivo químico apropiado.

Con el número de fisiones espontáneas del uranio 238, el número total de uranio 238, y el tiempo de vida media de este isótopo, se calcula el tiempo transcurrido desde la formación de la muestra. El contenido de uranio 238 es proporcional al contenido de uranio 235, el cual es fisiónable por absorción de neutrones térmicos. Por ello, la edad de una muestra se calcula a partir de tres parámetros: los números de trazas formadas por la fisión espontánea del uranio 238 por cm^2 . El número de trazas de fisión inducida por neutrones

¹Este equipo, que instaló un laboratorio especializado con apoyo del CONCYTEC, lo conformaron A. Zúñiga, G. Arroyo, J. Valencia y M. Montoya, y tesis de la Facultad de Ciencias de la UNI (M. Brocca y P. Flores, J. Espichán y R. Campomanes) y de la Universidad Católica (P. Pereyra).

²Ver p.e. R.L. Fleischer and P.B. Price, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, Vol. 28, pp 1705 - 1714, Pergamon Press Ltd.

térmicos del uranio 235 por cm^2 , y el flujo neutrónico térmico de irradiación de la muestra.

Como parte del proceso de implantación de la técnica en la UNI y el IPEN, se está trabajando sobre una muestra de obsidiana. Se ha determinado que el tiempo adecuado de ataque químico con HF concentrado al 30% es de 70 segundos. Ello permite obtener una distribución de diámetro de huellas inducidas con promedio de 3,2 micras y un ancho a media altura de 1,2 micras.

Para realizar la datación por huellas de fisión se debe hacer primero una calibración del reactor a usarse. El flujo ha sido medido con el método de hojuelas. Para medir gradiente se ha usado vidrio común, en cuya superficie se adhirió Kapton.

Por otro lado, para caracterizar el reactor RP-10, se preparó un sanguche que contenía muestras de macusanita, apatitas y vidrios patrones. Las muestras fueron irradiadas en el reactor RP-10 (agosto de 1990).

El objeto de la medición en las dos posiciones de irradiación es obtener la mayor eficiencia en la datación y el menor costo, para lo cual se está probando dichas posiciones de irradiación.

El primer trabajo en colaboración con otros laboratorios se ha realizado en base a ocho guijarros de macusanita recolectados en tres lugares sedimentarios fluvioglaciales (Caluyo Mayo, Chilcuno Chico y Samillia), los cuales fueron datados por el método de huellas de fisión (FT). En todos estos vidrios volcánicos, se observaron que las huellas de fisión espontáneas grabadas, en promedio, tienen diámetros más pequeños respecto a las huellas inducidas. Es decir, ellas han sido parcialmente disminuídas en sus diámetros por efectos térmicos. Como una consecuencia de ello, su edad aparente por FT, dentro del rango de 2,9 a 4,7 millones de años, está por debajo de la edad de erupción.

Las edades de plateau con FT pudieron ser medidas en siete muestras de macusanita. Interpretadas como edades de formación, su rango estuvo entre los 4,8 y 6,6 millones de años. Cuatro de estas muestras también fueron datadas por el método de K-Ar, con edades distribuídas entre 5,44 y 5,72 millones de años; para cada una de estas muestras, las edades de plateau con FT y K-Ar están en concordancia hasta dentro del 15% de error, lo cual sugiere que la pérdida radiogénica de argón 40 no es significativa desde el momento que tuvo lugar la erupción.

De nuestros resultados y de las determinaciones previas de las edades de

plateau por FT, se concluye que el vulcanismo en Macusani ocurrió entre 4,8 y 6,9 millones de años, posiblemente bajo la forma de eventos discretos.

8.6 Análisis de muestras geológicas

El equipo científico conformado por D. Esquivel y E. Montoya ha implementado un método de AAN instrumental y multielemental, aplicable a suelos, rocas, sedimentos, aerosoles y otras muestras de interés geoquímico y ambiental. En el análisis de una muestra certificada de sedimento marino, en un ejercicio internacional de intercomparación auspiciado por el OIEA ³, se obtuvo buenos resultados para los elementos Co, Fe, Na y Sb. Aunque en la citada muestra no existen valores certificados para los contenidos de Eu, La, Lu, Sc, Sm, Hf, Th, U, Ta, Tb, Ce y Cs, se obtuvo resultados concordantes con los de los otros laboratorios participantes. Actualmente se trabaja para optimizar el método.

8.7 Geología del uranio

G. Arroyo, J. Valencia y M. Rodríguez investigadores del IPEN han desarrollado el tema del uranio peruano. Después de varios años de trabajo han determinado el distrito uranífero de Macusani con el depósito Chapi. Se definieron 3 500 TM de uranio como recursos probado-probables.

El costo de explotación minera es de U.S. \$ 7,17/TM. El tratamiento para obtener el concentrado comercial de uranio tiene un costo de alrededor de \$ 20/TM.

La inversión en Macusani ha sido hasta hoy de \$ 3 000 000, de procedencia estatal y del OIEA. Se ha descubierto uranio por valor (1993) bruto *in situ* de U.S.A. \$ 140 000 000.

El año 1992 se realizaron experiencias de recuperación de uranio lográndose obtener concentrados. Se puede pronosticar un diagrama de flujos para el tratamiento de minerales de la siguiente manera: preparación física, lixiviación estática, extracción por solventes, precipitación y secado. Ello se ha realizado parcialmente en Puno, donde el IPEN cuenta con un laboratorio de hidrometalurgia, y el laboratorio especializado en San Borja.

³El auspicio del OIEA se hace en el amrcio de los Acuerdos Regionales para América Latina - Técnicas analíticas nucleares (ARCAL IV)

En lo que respecta a la explotación del depósito Chapi, se ha realizado diversos contactos con empresas vinculadas al uranio, principalmente del extranjero. Estas mostraron relativo interés, con expectativas en la futura reglamentación de la minería.

8-A Apéndice

Datación del vulcanismo Macusani

La macusanita se encuentra Macusani, región de Chapi, Puno. Se selecciona una muestra en una región que no haya sufrido recocido natural y presión externa. Después de codificar adecuadamente, se hace un corte que incluya la parte central del vidrio volcánico, la que ha sufrido menos recocido y presión externa. Se toma una porción de la parte cortada y se fracciona en pequeños trozos. Se toma una parte para la determinación de huellas fósiles y otra para las huellas inducidas.

Las porciones dedicadas a huellas inducidas son recocidas a una temperatura de 350 C, durante una hora, para borrar las huellas fósiles. Una muestra de 24,27 mg es colocada en una bolsita pequeña de 40,87 mg. Las muestras en las bolsas se colocaron en protamuestras cilíndricas de 7,7 cm de altura y 2,8 cm de diámetro. Quedan pendientes otras irradiaciones.

Se preparon cápsulas de plásticos para 2, 4, 6 y 10 minutos, se irradiaron las de 2 y 4 minutos.

Las muestras irradiadas y las no irradiadas fueron colocadas en la parte inferior de moldes de 1 cm de diámetro y 1 cm de altura, cubriéndolas luego de resina epóxica y dejándolas secar 1 día.

Se pulieron las caras de los cilindros. Para ello, se usó sucesivamente lijas metalográficas P230, P600 y P1000. Finalmente se pulió con alúmina (Al_2O_3) utilizando una pulidora Ecomet III. Se usó paños de pulido Micro-cloth.

Para grabar las huellas de la muestra se utilizó HF al 30% durante 60 s. Luego se lavó con agua.

Para la medición de la fluencia se usó la técnica de activación neutrónica de hojuelas metálicas, usando el formalismo de Westcott. Las hojuelas fueron de oro 197 bajo cadmio (Au/Cd) y hojuela desnuda (Au/B). En el portamuestras se distribuyó las hojuelas en el orden (Au/Cd), (Au/B) y (Au/Cd). La vida media del Au es $(64,26 \pm 0,31)$ h.

Para la determinación de la fluencia se midieron algunas cantidades, las que vamos a mencionar.

La razón de cadmio fue $10,78 \pm 0,12$.

La eficiencia del oro fue determinada usando patrones de bario 137 y cesio 137. La eficiencia obtenida para el Au fue $(2,042 \pm 0,0001)10^{-3}$. La

actividad absoluta del oro fue $(1,5807 \pm 0,0114)10^5 s^{-1}$.

El flujo térmico, medido a 10 MW, fue $(3,193 \pm 0,034) \times 10^{10} n/cm^2 s$ y la radiación fue a 7 MW, durante 120 s. De modo que la fluencia calculada para las condiciones de irradiación es de $\eta = (2,68 \pm 0,03) \times 10^{15} n/cm^2$

El conteo se hizo con el microscopio óptico ORTHOLUX, provisto de un ocular $\times 25$ y objetivo $\times 50$. La superficie de contaje se determinó con una cuadrilla de 10×10 de 0,01 cm de lado y 0,0004 cm² de área.

Se tomaron 215 campos para la muestra irradiada (inducida), determinados por dos filas de la cuadrícula. Para la muestra no irradiada (fósiles) se contó 242 campos, siendo cada campo toda la cuadrícula.

Las densidad de huellas inducidas y fósiles fueron

$D_i = (8,8 \pm 1,8)10^5 tr/cm^2$ y $D_f = (2,47 \pm 1,65)10^4 tr/cm^2$, respectivamente.

A partir de esos resultados se calcula la edad aparente: $t_a = (4,64 \pm 0,3)10^6 a$.

Este resultado puede ser comparado con $(2,88 - 4,93)10^6$ años, obtenido por G. Poupeau et al. ⁴.

Podemos concluir que con la determinación preliminar de la edad aparente de un vidrio volcánico por huellas de fisión, se está introduciendo existosamente esta técnica, la que merece mayor esfuerzo para su completo dominio.

⁴G. Poupeau, N. Sabil, I.M. Villa, G. Bigazzi, N. Vatin Perignon, P. Flores, P. Pereyra, G. Salas y G. Arroyo, a ser publicado en *Tectonophysics*.

Chapter 9

Tecnología y Medio Ambiente

9.1 Los desastres a mediano plazo

A lo largo de la historia, el uso de la tecnología ha significado modificación del medio ambiente, la que es aceptada a cambio de los beneficios obtenidos de esa tecnología. Para evaluar la relación riesgo/beneficio del uso de la tecnología es necesario tomar en cuenta diversos aspectos ecológicos.

La progresiva comprensión del problema ecológico está provocando la preocupación de la humanidad entera. El asunto no sólo se analiza en términos “sofisticados” -como algunos califican a los criterios ecológicos- sino también en términos económicos precisos.

Como ilustración, mencionemos algunas estimaciones hechas sobre los daños anuales que producen las actividades industriales en Alemania Federal¹. En términos monetarios, los daños son veinte mil millones de dólares anuales por polución del aire, ocho mil millones de dólares por polución del agua, dos mil millones de dólares por destrucción de suelos, dos mil millones de dólares por ruido. En estas evaluaciones no se han tomado en cuenta “la desaparición de numerosas especies y los daños psicosociales, los que son imposibles de precisar” afirma Gunther Schneider, Director General Responsable del Medio Ambiente de la Comunidad Europea.

En los países en desarrollo se está tomando conciencia de los riesgos

¹*Science et Technologie*, junio 1989.

tecnológicos. Uno de las regiones que han atraído la atención del mundo es la Amazonía, donde hay aspectos ecológicos y de vidas humanas que deben ser considerados antes de tomar decisiones de explotación. Muchas comunidades indígenas viven aisladas de los “países oficiales”, pero éstas reciben la visita de empresas que destruyen su *habitat* y se llevan la riqueza natural de sus suelos.

Otro de los problemas relacionados con el medio ambiente es el de los desechos. En Estados Unidos ha nacido el llamado síndrome NIMBY (*Not in my backyard*, es decir “No en mi patio trasero”), que indica el rechazo a emplazamientos de los desechos industriales. En este aspecto aún existe una mentalidad colonial en las relaciones Norte-Sur. En 1988 se reveló la existencia de proyectos de exportación de desechos europeos y norteamericanos hacia el África. Por algunas centenas de millones de dólares se planeaba dejar decenas de millones de desechos industriales europeos y norteamericanos. Otra forma camuflada y legal de dejar los desechos es instalar las industrias sucias en los propios países no desarrollados. De esa forma se llevan los productos y dejan la basura.

En ese contexto están naciendo una serie de organizaciones ecologistas, la mayoría de las cuales está compuesta por gente con buena voluntad y algunas con puro contenido político de oposición cerrada a todo avance tecnológico. Paralelamente, se fortalecen o nacen carreras ecologistas, que implican una serie de disciplinas científicas.

9.2 Electricidad y medio ambiente

La producción de energía es la actividad que mayor influencia tiene sobre el medio ambiente. Desde la antepenúltima reunión “Cumbre de la Tierra”, de hace 23 años, la polución no cesa de empeorar. El efecto invernadero y la destrucción del ozono han aumentado tanto, que nos obliga a pensar en las medidas que deben tomar todos los países. En ese lapso se ha perdido 200 millones de hectáreas de árboles y 500 millones de hectáreas de tierras cultivables. Más aún, decenas de miles de especies de plantas y animales han desaparecido. Por otro lado, el quemado de combustible fósil está produciendo gases “invernadero” que absorben la radiación externa y dan lugar al calentamiento global de la Tierra, amenazando con un desequilibrio climatológico de catastróficas consecuencias.

Uno de los principales agentes del efecto invernadero es el dióxido de car-

bono, CO₂, emitido por el quemado de combustible fósil (carbón, petróleo, gas) para la generación de energía. Entre 1972 y 1989 se pasó de 16,200 millones a 21,900 millones de toneladas de CO₂ emitidas a la atmósfera. El efecto invernadero ha sido declarado como el riesgo más grave que jamás se haya enfrentado. Las simulaciones en computadoras predicen que habrá un calentamiento global de la Tierra.

El problema de la polución producida por fuentes energéticas ha sido tratado ampliamente en diversas reuniones científicas. En 1991 se llevó a cabo un simposio de expertos sobre el tema ². Es oportuno echar una mirada al informe de ese simposio.

El 25% del CO₂ emitido a la atmósfera se debe a centrales térmicas con combustible fósil. Por otro lado, el quemado de combustible fósil produce SO₂ y NO_x que dañan el medio ambiente y tienen consecuencias funestas para las plantas y los seres humanos. La polución con SO₂ y NO_x podría ser atacada, aunque requiere de tecnología muy cara; pero la polución por CO₂ no encuentra otra solución que no sea el freno a la construcción de centrales de combustible fósil. Las fuentes de energía eléctrica que no generan gases invernadero son la solar, la hidráulica y la nuclear.

9.3 Aumento inexorable de consumo de energía

Entre 1965 y 1989 se ha incrementado constantemente el consumo de energía primaria, pasando de un equivalente de 4 mil millones a 8 mil millones de toneladas de petróleo.

La composición en porcentaje de las diversas fuentes energéticas ha variado sustancialmente entre 1960 y 1989, pasando de 47% a 28% para el carbón, de 13% a 21% para el gas, 34% a 39% para el petróleo, de 6% a 7% para las hidráulicas y de 0% a 6% para la energía nuclear.

El consumo de energía eléctrica también ha seguido aumentando, aunque aquí la composición por origen es distinta. De acuerdo a estimaciones de los especialistas, entre 1990 y 2010 se tendrá un cambio en el componente del origen de la energía eléctrica de 63% a 67% para combustible fósil, 20% a 18% para la hidráulica y de 17% a 15% para la energía nuclear.

Las tendencias señalan también que se consumirá menos petróleo, que

²Memorias del Simposio de Expertos en Electricidad y Medio Ambiente, Helsinki, 13 - 17 de mayo de 1991, OIEA, Viena

pasará de 26% a 8,2% y más gas, que pasará de 18% a 32,7% . Los combustibles fósiles en total tendrán una pequeña variación, de 56% a 58,9 %

9.4 Riesgos energéticos

Cada una de las fuentes de energía tiene sus riesgos. La emisión de carbono constituye, por ejemplo, un riesgo a través del efecto invernadero. Los cálculos indican que por equivalente en toneladas de carbono se produce 0,93 tonelada con carbón, 0,82 toneladas por petróleo y 0,57 toneladas por gas.

Entre los países generadores de mayores cantidades de CO₂ tenemos a los Estados Unidos con el 22% mundial y Japón con 4,4%. Cabe mencionar que Japón tiene planes para estabilizar esa producción. Los combustibles fósiles traen consigo consecuencias locales de polución del aire con partículas, SO_x, NO_x, hidrocarburos y material orgánico. También se contamina el agua con rastros metálicos de los residuos sólidos. Los impactos regionales más graves tienen que ver con la polución del océano, con pérdidas de especies; y con la degradación de los suelos por las emisiones de SO₂ y NO_x. En el largo plazo, las deposiciones de ácidos afecta también algunas especies. Finalmente, los cambios climáticos debido al CO₂ y otros gases provocarían calentamiento global y la elevación del nivel del mar.

Las energías renovables también tienen efectos negativos, entre los que pueden mencionarse los impactos locales de polución atmosférica, modificación de ecosistemas, pérdidas de especies y efectos de sedimentación, cambios en la calidad del agua y la vida marina. Regionalmente, se produce cambios en la calidad del agua y la distribución hidrológica.

La energía nuclear tiene riesgos de accidentes. Sin embargo, gracias a la presión de la opinión pública, particularmente sensible a los riesgos nucleares, éstos se han reducido hasta niveles ínfimos.

En lo que corresponde a los riesgos por accidentes, las estadísticas muestran que la energía nuclear es la más segura. Así por ejemplo, considerando el número de víctimas entre el público por 1 000 MW año, se calcula que el riesgo de la energía nuclear es 1000 veces menor que el carbón.

Como ejemplos podemos mencionar el accidente en la industria del carbón que en 1966 mató a 144 personas del público en Wales, Inglaterra. En 1982 una avalancha mató a 284 trabajadores del carbón en China.

Un accidente petrolífero en Inglaterra, que significó una explosión y fuego, causó 187 víctimas entre los trabajadores. En Brasil, un accidente petrolífero en 1984 causó 500 víctimas entre el público. Además, los accidentes petroleros causan daños ecológicos de grandes dimensiones.

El gas para energía también tiene sus víctimas. El más grave accidente tal vez sea la explosión en los Urales, URSS, en el que hubo cerca de 1000 víctimas.

Las centrales hidroeléctricas son las más catastróficas. Un accidente en Gujarati, India, en 1979 causó 15 000 víctimas. En Italia, en 1963, un ruptura de represa causó 1,989 víctimas. En Cundinamarca, Colombia, en 1983 se originó 150 víctimas.

El accidente nuclear de Chernobil, en 1986, causó 31 víctimas inmediatas entre sus trabajadores. No se ha evaluado el número de víctimas entre la población aledaña, la que ha sido evacuada. El área que rodea Chernobil está contaminada.

Cabe señalar que el de Chernobil fue un accidente producido en una central construida con bajísimas condiciones de seguridad, como en ninguna central existente en Occidente. En comparación podemos recordar que el accidente de Three Mile Island, los Estados Unidos, no tuvo ninguna víctima, debido precisamente a su tecnología de seguridad nuclear.

9.5 ¿Qué tipo de producción energética instalar?

Para decidir qué fuentes energéticas instalar en un lugar, es necesario entonces tomar en cuenta una serie de variables relacionadas con el impacto sobre la salud de la población y sobre el medio ambiente.

Los riesgos de la explotación de un determinado tipo de fuente energética pueden ser locales, regionales y globales. Aún cuando estos riesgos son evidentes, recién en la última década se está estudiando la forma de evaluarlos. Sin embargo, cabe señalar que se ha intensificado las investigaciones sobre nuevas tecnologías para la operación y el control óptimo de centrales, disminuyendo considerablemente los riesgos. En ese sentido, es fundamental contar con personal entrenado y sistemas de seguridad adecuados, significando definitivamente mayores gastos.

Es por ahora difícil controlar el riesgo que conlleva la producción de dióxido de carbono, debido al quemado de combustible fósil. El efecto invernadero que provoca este gas es global y concierne entonces a toda la

humanidad.

Ello ha creado entre los ecologistas una dirección anti CO₂, es decir la decisión de disminuir las centrales que emitan más CO₂ por energía generada. En esta categoría entra el petróleo y el carbón.

Precisamente, en la reunión “Cumbre de la Tierra” que se llevó a cabo en Río de Janeiro, en 1992, los mandatarios de los países han firmado el tratado para evitar el calentamiento de la Tierra.

Todo indica que los futuros estudios sobre alternativas energéticas tendrán componentes relacionados con la salud y el medio ambiente y las condiciones socioeconómicas de los países y de las regiones.

Para llevar a cabo esos estudios, se tiene el problema principal de cuantificar esos riesgos y utilizarlos en forma tal que la selección de un determinado escenario energético sea claramente el más apropiado para una región.

En el caso del Perú, tenemos el problema de la inestabilidad climática que debería aconsejarnos no depender del agua. Más aún, los evidentes riesgos ecológicos que conlleva la modificación de las corrientes en las cuencas del Mantaro, debe hacernos reflexionar para no cometer errores de trasvases cuyas consecuencias son impredecibles.

Por otro lado, debe revisarse las propuestas de proseguir la construcción de centrales de petróleo en Lima. Esta fuente está vetada entre los especialistas en medio ambiente, debido precisamente a su alto nivel de polución.

9.6 Biodiversidad

El tema del medio ambiente está relacionado con la biodiversidad. En ocasión de la Cumbre de la Tierra, en junio de 1992, los países del mundo firmaron el “Convenio sobre la Diversidad Biológica”. El presidente George Bush no quiso firmarlo, argumentando que frenaría las investigaciones sobre biotecnologías, consideradas claves para el desarrollo de la humanidad durante el siglo XXI. ¿Hay algo de verdad en ello?

Para responder a la pregunta arriba mencionada, es necesario recordar algunos aspectos del convenio, en particular los relacionados con los derechos de los “propietarios” de los recursos y de los que realizan investigación tecnológica sobre éstos.

En el preámbulo del convenio se afirma “que la conservación de la diversidad biológica es de interés común de toda la humanidad”

Como principio se señala que los Estados tienen derecho soberano de explotar sus propios recursos biológicos en aplicación de su propia política ambiental y la obligación de asegurar que las actividades que se lleven a cabo, dentro de su jurisdicción o bajo su control, no perjudiquen al medio de otros Estados o de zonas situadas fuera de toda jurisdicción nacional.

También se trata de compartir, en forma justa y equitativa, los resultados de las actividades de investigación y desarrollo y los beneficios derivados de la utilización comercial y de otra índole de los recursos genéticos con la parte contratante que aporta esos recursos. Esta participación se llevará a cabo en condiciones mutuamente acordadas.

En lo que respecta al acceso de tecnología y transferencia de tecnología se dice, entre otras cosas, que “se asegurará, en particular a los países en desarrollo, que aportan recursos genéticos, el acceso a la tecnología que utilice ese material y la transferencia de esa tecnología, en condiciones mutuamente acordadas, incluida la tecnología protegida por patentes y otros derechos de propiedad intelectual ...”

La controversia que plantean los Estados Unidos reside en la tesis que si un laboratorio tiene que compartir los resultados de su investigación con los países donde se encuentran los recursos biológicos, su voluntad para iniciar dicha investigación decaerá.

Por su parte, los países en desarrollo con abundantes recursos biológicos vendrían a ser los nuevos ricos del siglo XXI, gracias a su “propiedad” biológica, a su conservación, y a las investigaciones de los laboratorios del Norte.

Este aparente facilismo sería otra versión del *boom* petrolero, en el que gracias a la venta de su riqueza natural, algunos países lograron influencia económica en el mundo. En tal sentido, los recursos biológicos tendrían un tratamiento similar a las materias primas que son vendidas por el mundo en desarrollo y transformadas por el mundo desarrollado.

La diferencia entre el tratamiento de la materia prima convencional y la biológica, según los términos del Convenio, sería en el beneficio de los países propietarios.

En la materia prima convencional se logra un precio por ella, mientras que en los recursos biológicos se paga con derechos en la investigación de otros.

Al fin de cuentas, independientemente del convenio, la experiencia nos induce a pensar que los países que investiguen sobre los recursos biológicos

lograrán el control de todos los mecanismos de investigación, producción y comercialización. Los reclamos de derechos sobre la vida, la que tomó millones de años en formarse naturalmente, constituirán otro capítulo de la historia que consiste en repetir “que investiguen los otros”, pero esta vez ganando algo.

Ello no debe hacernos perder de vista los avances realizados por civilizaciones como las prehistóricas, a las que se debe la conservación, desarrollo y en algunos casos domesticación y puesta a disposición de una diversidad de recursos genéticos, que han servido de base para las investigaciones actuales realizadas con tecnología moderna.

9.7 Centro Nuclear “RACSO” y medio ambiente

El C.N. “RACSO” de Huarangal, se encuentra ubicado a 28 km al norte de la ciudad de Lima, en el distrito de Carabayllo. Este centro cuenta con un reactor de investigaciones de 10 MW, una planta de producción de radioisótopos y laboratorios de investigación en física, química, biología, y protección radiológica.

Para asegurar el funcionamiento con la reglas de seguridad y protección radiológica adecuadas, se han realizado una serie de estudios sobre la influencia del centro en el medio ambiente.

Un equipo combinado del IPEN y la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN) realizó un estudio de campo para identificar las poblaciones biológicas más representativas de la zona adyacente al tramo del río Chillón, comprendido entre la localidad de Puente Trapiche y Puente Piedra (zona del río considerada como de influencia del ahora C.N. “RACSO”)³ Se identificó doce especies herbáceas, trece de flora acuática flotante y sumergida, una con moluscos, cuatro de insectos, cinco de peces, una de batracios y otra de reptiles. Finalmente identificaron 15 especies de aves.

P. Zúñiga et al. hicieron una evaluación climatológica y determinaron las características dispersivas de la atmósfera en el entorno al centro nuclear. Ellos obtuvieron datos meteorológicos como presión atmosférica, temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección predominante de vientos, tomados

³P. Zúñiga, S. Regalado, M. Espinoza, E. Culqui, *Estudio preliminar de la flora y fauna silvestre del cauce y monte ribereño del Chillón*, IPEN, 1981

in situ mediante una estación meteorológica con información de un año de operación. Asimismo, evaluaron la rosa de vientos y los factores de dilución. Además estudiaron los niveles de exposición a la radiación de fondo debido a fuentes naturales y artificiales. Obtuvieron datos de exposición por intermedio de integración dosimétrica de pastillas de CaF_2Dy , sensibles a niveles de radiación ambiental. Los valores resultantes oscilaron entre 9,9 y 13,5 $\mu\text{R}/\text{h}$, lo que equivale a una dosis de 0,82 $\text{mSv}/\text{año}$. También se realizó muestreos ambientales en la zona para evaluar los niveles de estroncio 90 y cesio 137, radionucleídos de largo período de interés radiosanitario, provenientes del *fall-out* radiactivo que causó la detonación de armas nucleares. Durante un año y según frecuencia programada se tomó y midió muestras de agua superficial y subterránea en la cuenca del río Chillón, sedimentos, tierra y lecho.

El valor más alto obtenido fue de $3,7 \times 10^{-3}$ Bq/l de estroncio 90 y $53,8 \times 10^{-3}$ Bq/l de ^{137}Cs en agua de río.

Para terminar, P. Zúñiga et al. realizaron una evaluación del impacto radiológico ambiental que produciría del C.N. "RACSO" un vez que entre en operación. Aquí, identificaron los grupos críticos, se aplicaron modelos ambientales y factores dosimétricos. En tablas se presentan las dosis por incorporación según radionucleído, conforme a los niveles de descarga previstos. Como conclusión se estima una dosis anual de $1,2 \times 10^{-7}$ Sv para el grupo crítico y de $3,9 \times 10^{-4}$ Sv-hombre para la región, por operación normal del C.N. RACSO.

El 19 de diciembre de 1988 entró en operación el reactor de investigación de 10 MW (RP-10) y la planta de producción de radioisótopos (PPR) dándose inicio al programa de vigilancia radiológica ambiental que abarca el área que circunda el C.N. "RACSO" con una distancia de 6 km respecto al RP-10⁴.

EL programa de vigilancia radiológica permite al VCA identificar y cuantificar la presencia de radionucleídos artificiales en el medio ambiente, consecuentes de las descargas controladas líquidas o gaseosas, efectuadas durante la operación normal del RP-10 y planta de producción de radioisótopos, PPR. En el marco de ese programa el VGA realizó mediciones directas en leche, agua, aerosoles, para la detección de yodo 131, radionucleído de importancia radiosanitaria de vida media corta. Mediciones isotópicas gamma

⁴El grupo de control ambiental (VCA) estaba conformado por S. Gonzales, J. Osoreo, D. Rivera, L. Yamada, V. Ramirez y R. Jara.

y beta total en las muestras anteriormente mencionadas incluyendo además vegetales, forraje y sedimento. Los resultados obtenidos a la fecha evidencian la ausencia de radionucleídos artificiales en los diferentes contenidos ambientales analizados, lo cual nos indica que los niveles de radiactividad ambiental se mantienen en el nivel normal de radiactividad de fondo. Ello permite asegurar al VCA que la operación en las instalaciones del C.N. "RACSO" no representa un riesgo indebido para el hombre y su medio ambiente.

La vigilancia radiológica en el medio ambiente, consiste en detectar, identificar y cuantificar la presencia de radionucleídos artificiales originados por la operación de instalaciones nucleares y/o los originados en todo el mundo.

No se ha observado actividad artificial desde diciembre de 1989. En las estaciones de Huancayo, Tacna, Arequipa y Lima, se determinó que los niveles de radiactividad artificial se enmascaran con los del fondo natural.

En el Perú, los valores de mayor actividad beta totales se produjeron entre los años 1966 a 1974, coincidiendo con los ensayos nucleares franceses en el Atolón de Mururoa. Sin embargo, en ningún momento, se llegó a los valores superiores del centésimo del límite máximo que corresponde a 11,1 Bq/m³.

Por otro lado, en 1993 se estudia la migración y transferencia del yodo 131 en dos cultivos: maíz y haba, realizando incorporaciones de este radionucleído a través de los sistemas agua-planta y agua-suelo-planta en condiciones de laboratorio.

Además, el grupo de control ambiental estudia el comportamiento meteorológico de la zona de influencia del C.N. "RACSO" a fin de establecer una adecuada vigilancia radiológica ambiental. La estación meteorológica ubicada en el C.N. "RACSO" fue instalada en convenio con el Servicio Nacional de Meteorología (SENAEMHI) teniéndose a la fecha toda la información desde el año 1981, lo que permitió observar que las condiciones de dirección y velocidad de viento están orientadas en dirección Sur-Norte, por lo que se establece como zona crítica el valle de Huarangal, ubicado al Nor-Este del C.N. "RACSO".

Para sus fines, el GCA desarrolla la radioquímica ambiental. Considerando que la mayoría de los radionucleídos de importancia radiosanitaria ambiental son emisores beta, se tiene en ejecución la investigación para la determinación de radioestrucios en muestras ambientales utilizando técnicas radioquímicas.

Dicho proyecto nos permitirá obtener valores referenciales para compa-

rarlos con otros laboratorios a nivel regional así como tener capacidad de respuesta para evaluar analíticamente la calidad radiológica de una muestra a fin de determinar su grado de aceptación para consumo masivo de acuerdo a las normas vigentes.

En 1993, en coordinación con el Instituto del Mar (IMARPE), en el programa de vigilancia ambiental se ha incluido el control en componentes marinos de nuestro litoral.

En lo que concierne a los desechos radiactivos, W. Cruz y M. Mallaupoma iniciaron trabajos dirigidos a su gestión. Dentro del análisis de Seguridad realizado para la operación del C.N. "RACSO" se hicieron estimaciones en relación a la generación de residuos radiactivos que produjeran sus instalaciones más relevantes como son el reactor nuclear de 10 MW así como la planta de producción de radioisótopos durante los años de operación.

9.8 Las consecuencias de Chernobil

El GCA liderado por S. Gonzales se dedica también al análisis radiométrico de alimentos. Con el accidente de Chernobil en 1986, todos los países reforzaron la vigilancia radiológica en productos alimenticios de importación, principalmente los de procedencia europea. En nuestro país esta actividad estuvo a cargo del IPEN hasta Julio de 1992. A partir de esa fecha, el IPEN autoriza a la Empresa Nuclear Multiservice S.A., a realizar dichos controles.

Por otro lado, a raíz del accidente de Chernobil, D. Rivera del IPEN determinó los niveles de radiactividad de dos radionucleídos de importancia radiosanitaria como estroncio 90 y cesio 137 en diferentes marcas de leche maternizadas nacionales como importadas que se consumen en Lima.

El estroncio 90 es determinado por el método de precipitación selectiva usando ácido nítrico fumante, el nivel de radiactividad se justifica sobre ^{90}Y , (descendiente del estroncio 90), en un contador beta de bajo fondo, la recuperación radioquímica se evalúa por gravimetría y la evaluación de su portador natural, el calcio se realiza por el método volumétrico de permanganometría.

Los resultados muestran niveles por debajo de los límites establecidos, así como las dosis equivalentes efectivas evaluadas en el primer año de vida en todos los casos se encuentran por debajo de 0,1 mSv/año.

9.9 Emergencias radiológicas en el Perú

R. Ramírez analizó la problemática generada por la utilización de fuentes de radiaciones ionizantes en forma extendida e intensiva, en campos tales como el industrial y médico, entre los principales, y cuyo potencial para producir accidentes se estima sea alto, según R. Ramirez.

En el estudio se efectúa un relevamiento de la cantidad de fuentes de radiaciones que se utilizan en el país y sus características, así como se hace una estimación de las posibles vías de accidente y sus probabilidades, asociándole valores derivados de fuentes de información de accidentes ocurridos a nivel mundial.

R. Ramirez manifiesta la necesidad de establecer un programa básico destinado a encarar las emergencias que puedan ocurrir, a fin de prevenir desastres causados por un accidente radiológico.

En consecuencia, podemos afirmar que en el Perú las actividades nucleares tienen un control continuo, a pesar de que los riesgos son bajos. Los profesionales que tienen a su cargo la protección radiológica han sido formados durante mucho tiempo, en el marco de cursos especializados en el Perú y en el extranjero. Estos profesionales brindan además el apoyo técnico necesario para que las facilidades de radiación ionizante sean usadas con el menor riesgo posible.

Para ello, a través del CSEN se organiza cursos sobre protección radiológica tanto en Lima como en diversas ciudades del país.

El Presidente del IPEN es la Autoridad Nacional para el control y fiscalización nuclear en el Perú, responsable de dar las autorizaciones de construcción y funcionamiento de facilidades radiactivas, así como resolver asuntos relacionados con la seguridad radiológica.

9.10 Radiaciones y control biomédico

Para ejecutar la vigilancia radiológica del personal ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes o en potencial riesgo de sobreexposición se cuenta con un grupo de control médico radiosanitario que realiza la evaluación clínica y los análisis de laboratorio complementarios.

Los exámenes de laboratorio comprenden en primer término el estudio citogenético del personal y en segundo término la evaluación de la conta-

minación interna en caso de incorporación de material radiactivo ⁵. En ambos casos se cuenta con el equipamiento y las técnicas adecuadas a los requerimientos de la rutina.

M. Espinoza, biólogo especialista en citogenética humana dirige un equipo en crecimiento. Las expectativas en esta disciplina, afirma M. Espinoza, provienen del explosivo desarrollo de biología molecular y la radiobiología, las que atraen a científicos de diversas disciplinas. En el IPEN se ha generado un polo de desarrollo tecnológico en biología, que recibe la participación de investigadores de otras instituciones, en particular de la Universidad Nacional de San Marcos, con amplia experiencia en ciencias biológicas y de los hospitales, cuyo cuerpo médico ha tomado conciencia de la importancia de atacar los problemas médicos al nivel molecular.

⁵J. Descailleaux, D. Valencia, M.L. Guevara y M. Espinoza, *Informe Nuclear*, vol 2, número 1, 1984

Chapter 10

Perspectivas Nucleares del Perú

El programa nuclear del Perú fue impulsado con la creación del Instituto Peruano de Energía Nuclear, el 4 de febrero de 1975. La construcción de C.N. "RACSO" de Huarangal -realizada por la Comisión de Energía Atómica (CNEA) de Argentina- y de los otros centros del IPEN, han significado la mayor inversión del Estado en ciencia y tecnología. Sin embargo, no se ha completado el equipamiento que sirve para la utilización plena de estas facilidades.

Por otro lado, debido a que la investigación no es promovida con recursos remunerativos a los docentes, la universidad ha abandonado virtualmente los laboratorios universitarios. En ese marco, la utilización de la infraestructura nuclear por la universidad no significa ningún estímulo concreto para los eventuales usuarios.

Por otro lado, el sector privado no tiene tradición de investigación tecnológica y es conservador respecto al uso de nuevas tecnologías. Por ello no participa en trabajos de investigación tecnológica, lo que ha dado como resultado su falta de competitividad tecnológica y comercial en el mundo y la consiguiente pobreza del país entero.

Las perspectivas de la investigación científica y tecnológica dependen de la promoción por parte del Estado. Se trata de realizar un intenso y amplio programa de difusión de las ventajas que se logran con el empleo de nuevas tecnologías.

Las aplicaciones nucleares tienen la misma problemática que las otras

actividades científicas y tecnológicas en general. Sin embargo, por la magnitud de la infraestructura nuclear, sería de gran trascendencia la utilización masiva de todo su potencial, movilizándolo a investigadores universitarios, estudiantes, ingenieros y científicos de los sectores estatal y privado.

Ello será beneficioso al Perú en el mediano plazo, porque elevará los niveles de competencia científica y tecnológica nacional.

Lo que abre las posibilidades del inicio de una era científica, tecnológica y nuclear en el Perú, es el claro convencimiento al que está llegando la comunidad sobre la necesidad de crear industrias competitivas para sobrevivir en un mundo cada vez más abierto al mercado internacional.

Las diversas negociaciones comerciales en el mundo van en la dirección de la promoción del desarrollo tecnológico. Los mecanismos de protección a los inventos e innovaciones tecnológicas y la eliminación de las barreras comerciales, generará una presión hacia la investigación.

En consecuencia, es probable que al final de siglo XX se haya establecido un sistema de promoción y desarrollo tecnológico con recursos para cumplir su rol en plenitud.

En tal sentido, actualmente, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC) está finalizando un plan de desarrollo científico y tecnológico que pondrá en consideración del Congreso y del Gobierno peruanos. Ello abre la esperanza que se dicten normas promotoras que reactiven la ciencia y la tecnología en el Perú.

Un signo alentador es que en la nueva Constitución se le asigna al Estado el deber de promover el desarrollo científico y tecnológico en el país. Y promover significa invertir, otorgar los recursos para que los diversos agentes del desarrollo se pongan en marcha para avanzar en un marco de desarrollo integral.

La promoción del desarrollo tecnológico significará, naturalmente, un estímulo para usar la infraestructura científica y tecnológica del país, constituida en gran parte por los diversos centros de desarrollo del Instituto Peruano de Energía Nuclear.

Bibliografía

- Scientists in Power*, Harvard University Press, 1979.
- Colloque International sur l'Histoire de la Physique des Particules, Journal de Physique*, París, C8-1982.
- La Recherche en Physique Nucléaire*, Editions du Seuil, 1983.
- La Radiactivité Artificielle et son Histoire*, Pierre Radvanyi y Monique Bordry, Editions du Seuil, mayo 1984.
- Jacques Leclercq, *L'Ere Nucléaire*, Hachette, París, 1986.
- Yuval Ne'eman y Yoram Kirsh, *The Particle Hunters*, Cambridge University Press, 1986.
- Revista Nuclear*, Publicación de la Asociación de Profesionales Nucleares del Instituto Peruano de Energía Nuclear, volúmenes de los años 1983, 1984, 1985, 1986, 1987.
- Michel Riordan, *The Hunting of the Quark*, Simon and Schuster/Touchstone Books, New York, 1987.
- Richard Rhodes, *The making of the Atomic Bomb*, Simon and Schuster/Touchstone Books, New York, 1987.
- Revista Peruana de Física*, Publicación de la Sociedad Peruana de Física (SOPERFI), volúmenes de los años 1989, 1991, 1992, 1993, Lima.
- Memorias del Simposio de Expertos sobre *Electricity and the Environment*, Helsinki 13-17 de mayo de 1991. Una publicación del OIEA, Viena.
- Boletines del Organismo Internacional de Energía Atómica, desde el año 1987, Viena.
- Speaking of Nuclear Energy*, Highlights of Proceedings from IAEA, Public Information Regional Seminars, Fall 1992, Viena.
- IAEA Yearbook 1992*, OIEA, Viena.