

RADIOACTIVIDAD NATURAL (NORM) EN YACIMIENTOS

Guillermo Eduardo Maggio - Carlos Girardi
Noldor S.R.L. Pluspetrol S.A.

SINOPSIS

Más del 92% de la dosis efectiva de radiación recibida por un individuo promedio en cualquier lugar del mundo proviene de la presencia de fuentes radiactivas naturales conocidas por las siglas en inglés *NORM* (Naturally Occurring Radioactive Materials).

A efectos de evaluar tanto el impacto ambiental como las dosis recibidas por los trabajadores se estudió la presencia de *NORM* en los yacimientos de Pluspetrol a través de catorce campañas.

El estudio consistió en el control externo de instalaciones, poniéndose especial énfasis en aquellos lugares más susceptibles de acumular radioisótopos naturales. También se recolectaron muestras de agua superficial y subterránea, de vegetales y de aire para su medición en laboratorio.

Los resultados permitieron concluir que la mayor parte de las instalaciones presentaban tasas de dosis similares al fondo natural aunque, en algunos puntos, se midieron valores superiores y, en ciertos sectores aislados, se detectaron niveles excepcionalmente altos. Sin embargo, en todos los casos, la integración anual de las dosis, teniendo en cuenta la cantidad de horas que un trabajador permanece en contacto con los puntos considerados, condujo a valores muy inferiores a los límites vigentes. En lo que respecta a las muestras de agua y aire, también se encontraron valores normales.

INTRODUCCION

A comienzos de la década del 80 se encontraron materiales radiactivos durante operaciones con petróleo y gas en el Mar del Norte, en tanto que en 1986 se hallaron en tuberías que habían sido removidas de pozos ubicados en el estado de Mississippi en los Estados Unidos en una operación de rutina.

Desde ese momento, diversos países industrializados comenzaron a estudiar los efectos de los materiales radiactivos naturales en los trabajadores de las industrias del petróleo y gas. Estas investigaciones cobraron especial énfasis a principios de la década del 90 y tuvieron en cuenta, particularmente, la existencia de ciertos isótopos del radio en aguas de formación, bajo la forma de sales de calcio, bario y estroncio y la presencia en cuencas gasíferas del gas radón-222 (^{222}Rn) que suele concentrarse, posteriormente, en las fracciones de etano y propano. Dichos materiales son conocidos en esos ámbitos por las siglas en inglés *NORM* (Naturally Occurring Radioactive Materials).

Incrustaciones, deposiciones y presencia en capas de óxido en herramientas, recipientes, unidades de proceso, grandes tanques para almacenamiento de hidrocarburos y depósitos de desechos industriales fueron especialmente analizados para evaluar tanto el impacto ambiental como las dosis recibidas por trabajadores (exposición ocupacional) y miembros del público debidas a irradiación externa e interna.

Los isótopos radiactivos permanecen normalmente en la fase acuosa y pueden incorporarse por si mismos en incrustaciones a través de la coprecipitación de sulfato de radio conjuntamente con sulfato de bario o estroncio o bien precipitar en barros.

Por su parte, el gas radón tiene un punto de ebullición comprendido entre los correspondientes al etano y el propano. Por ello en las unidades de procesamiento de gases generalmente se encuentran niveles de radiactividad más altos en bombas, tanques y conductos asociados con la producción de etano y propano.

Las investigaciones anteriores, que no se limitaron a yacimientos sino que se extendieron también a plantas de tratamiento y destilerías, dieron lugar a una serie de importantes recomendaciones y, en algunos casos, a normas de cumplimiento obligatorio. Entre ellas: monitoreo periódico con instrumental especializado, clasificación de áreas según niveles de dosis, descontaminación de herramientas, materiales y recipientes, control del personal afectado, cálculos de impacto ambiental y efectos sobre el público en general. Estos controles son también recomendables antes de efectuar tareas de limpieza en grandes tanques, separadores y diversos dispositivos susceptibles de albergar altos contenidos de NORM.

Asimismo, la prevención y control de la contaminación hídrica (aguas superficiales y subterráneas) o la determinación del origen de la misma para deslindar o asumir responsabilidades o bien contribuir a un mejor manejo de aguas residuales o de producción es otro de los objetivos de las mencionadas normas.

DESARROLLO

Radiactividad

Según la teoría atómica más elemental, el núcleo atómico está constituido por dos tipos de partículas: *protones* y *neutrones*. La cantidad de protones es llamada *número atómico* y es determinante del comportamiento químico del elemento al que el átomo pertenece, mientras que la suma de ambos tipos de partículas se denomina *número de masa*. Existen átomos con igual número atómico y distinto número de masa, son llamados *isótopos* del elemento en cuestión.

Para ciertos valores de los números atómico y de masa los núcleos son estables, es decir que en función del tiempo, no sufren alteraciones de no mediar alguna acción externa. Cuando la cantidad de neutrones en un núcleo es mayor o menor que la correspondiente al estado estable, el núcleo trata de lograr la estabilidad a través, principalmente, de la emisión de partículas *alfa* o *beta*. A este proceso se lo denomina desintegración radiactiva y puede ir acompañado de emisión de radiación electromagnética de origen nuclear, es decir radiación *gamma*.

La velocidad con la que una sustancia radiactiva desintegra es proporcional a su masa y se llama *actividad*, siendo su unidad de medición el *Becquerel* que equivale a una desintegración por segundo ($1 \text{ Bq} = 1 \text{ d} / \text{s}$). En la práctica también suele utilizarse otra unidad más antigua, llamada *Curie* ($1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}$). El tiempo que demora una masa dada de un radioisótopo en reducirse a la mitad por efecto de la desintegración radiactiva se denomina *período de semidesintegración* y se mide en unidades de tiempo.

En la corteza terrestre existen 68 isótopos radiactivos. Los más importantes son el potasio-40 (^{40}K), el rubidio-87 (^{87}Rb) y aquellos que integran las tres cadenas naturales: serie del uranio-235 (^{235}U) compuesta 17 por radioisótopos, serie del uranio-238 (^{238}U) compuesta por 19 radioisótopos y serie del torio-232 (^{232}Th) compuesta por 12 radioisótopos. Todos ellos constituyen, conjuntamente con la radiación de origen cósmico, la principal fuente de las radiaciones recibidas por los seres humanos.

Además de los mencionados radioisótopos naturales, en la actualidad también pueden encontrarse en muestras de aguas superficiales o subterráneas isótopos radiactivos de origen antropogénico

principalmente tritio (^3H), cobalto-60 (^{60}Co) y cesio-137 (^{137}Cs). Este último presenta, en el hemisferio sur, variaciones de concentración estacionales.

Exposición a las radiaciones

Cuando un haz de radiaciones atraviesa un medio se producen interacciones que dependen tanto del tipo de radiación como del material irradiado, pero cualquiera sea el caso, el medio absorbe energía.

Ahora bien, si el material involucrado en este proceso es un tejido biológico pueden producirse alteraciones a nivel celular capaces de generar efectos nocivos para el ser vivo. Para estudiar y cuantificar los efectos biológicos de las radiaciones, como así también las medidas de protección radiológica necesarias, se han definido una serie de parámetros, algunos de los cuales se describen a continuación.

Dosis: definiciones

Dosis absorbida es la energía de radiación entregada a un cuerpo por unidad de masa. Su unidad es el *Gray* ($1\text{ Gy} = 1\text{ J / Kg}$). Depende de la energía de la fuente emisora.

Dosis equivalente es la magnitud que resulta de ponderar la dosis absorbida aplicando un factor de calidad dependiente del tipo de radiación involucrada (partículas alfa o beta, neutrones o radiación gamma). Su unidad tiene una dimensión idéntica a la correspondiente a dosis absorbida, pero se denomina *Sievert* (Sv). Por lo general se utilizan sus submúltiplos μSv y mSv .

Dosis efectiva es la suma de las dosis equivalentes ponderadas por un factor que evalúa el detrimento producido en cada órgano humano irradiado. A partir de ella pueden evaluarse los efectos biológicos de las radiaciones. Estos tienen una componente estocástica, lo que significa que a mayor dosis absorbida por un ser humano mayor será la probabilidad de que aparezcan efectos a largo término.

Finalmente, la *dosis efectiva comprometida* considera la incorporación de una sustancia radiactiva al organismo e integra los efectos sobre el órgano afectado en función del tiempo, a lo largo de un período de cincuenta años para trabajadores y de setenta para el público.

Límites de dosis

La *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) en el ámbito internacional y la *Autoridad Regulatoria Nuclear* (ARN) en la Argentina han establecido límites de dosis efectiva, equivalente y otros parámetros derivados tanto para trabajadores como para el público. En el primer caso se estipularon límites anuales tales que la probabilidad de que una persona que trabaja con radiaciones ionizantes se vea afectada por las mismas sea igual a la probabilidad de sufrir accidentes para un trabajador que se desempeñe en una industria convencional que se encuentre entre las más seguras. Para el caso del público los límites son muy inferiores y equivalen al riesgo de accidente asumido por una persona por el hecho de habitar en una gran ciudad moderna. Evidentemente, todos los datos probabilísticos fueron obtenidos a partir de análisis estadísticos realizados a nivel mundial. Los límites así establecidos son empleados para el diseño de experiencias y la planificación de actividades que impliquen la utilización de materiales radiactivos de manera de que las mismas se desarrollen en un marco de máxima seguridad.

Las normas para trabajadores establecen las siguientes condiciones:

“El límite de dosis efectiva es de 20 mSv en un año. Este valor debe ser considerado como el promedio en 5 años consecutivos (100 mSv en cinco años), no pudiendo excederse los 50 mSv en un

año. El límite de dosis equivalente es de 150 mSv en un año para el cristalino y 500 mSv en un año para la piel.”

Para el público en general las normas son más exigentes:

“El límite de dosis efectiva es de 1 mSv en un año. El límite de dosis equivalente es de 15 mSv en un año para el cristalino y 50 mSv en un año para la piel.”

Fuentes de radiación

Un ser vivo puede estar sometido a radiaciones originadas en fuentes externas, es decir materiales con los que no se toma contacto físico, o en fuentes internas, debido en la ingestión e inhalación de materiales radiactivos como consecuencia del pasaje de los mismos a la atmósfera o a las cadenas alimenticias a través de distintos mecanismos de transferencia.

El 88% de la dosis efectiva recibida por un individuo promedio procede de fuentes naturales tal como se detalla en la Figura 1.

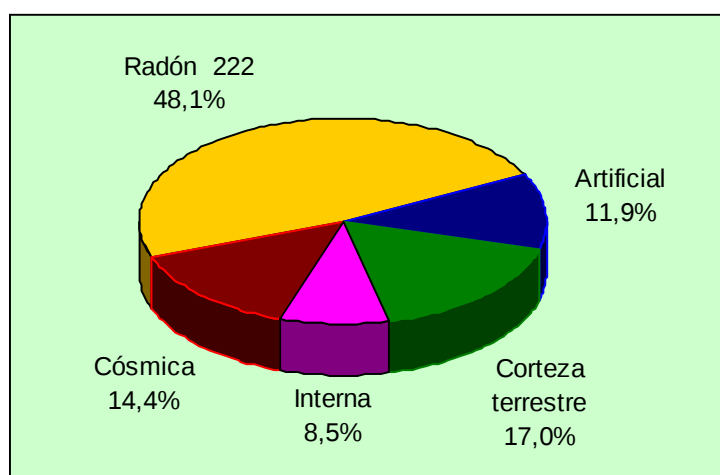


Figura 1: Fuentes de radiación

Del 12% correspondiente a fuentes artificiales, el 94,5% son consecuencia de aplicaciones médicas (diagnóstico y terapia) y sólo 5,5% ocasionadas por otras fuentes (lluvia radiactiva, centrales nucleares, industrias no nucleares, bienes de consumo, ocupacional). La Figura 2 ilustra esta situación.

De estas cifras surge la importancia de estudiar con detenimiento los efectos de las radiaciones de origen natural sobre el ser humano. Como se mencionó anteriormente, esto es particularmente importante para los trabajadores de algunas industrias tales como las de petróleo y gas.

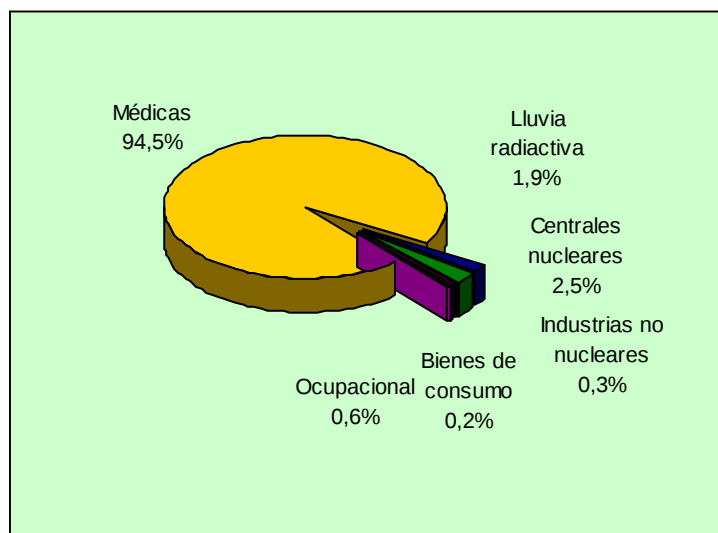


Figura 2: Fuentes artificiales de radiación

Gas radón

El radón es un gas radiactivo que existe en la naturaleza formando parte de las ya mencionadas cadenas radiactivas naturales. Dado su característica gaseosa suele separarse de las mismas para fluir de la tierra en todo el planeta constituyéndose así en la mayor fuente de radiación –natural o artificial- a la que un ser humano está sometido.

En efecto, como se aprecia en la Figura 1, el 48% de la dosis de radiación recibida por un individuo promedio en todo el mundo se debe a la presencia del gas radón. Sin embargo, la causa principal de esa dosis no es tanto la acción de este gas inerte sino la de sus hijas que son químicamente activas.

Aparte de la propia corteza terrestre, otras fuentes de radón son los servicios domiciliarios o industriales de gas y agua, especialmente cuando esta última procede de napas muy profundas. En el caso particular de yacimientos, y principalmente en cuencas gasíferas, este gas suele concentrarse, posteriormente, en las fracciones de etano y propano.

Mediciones de radiactividad

La radiactividad natural genera un “fondo” de radiaciones que afecta cualquier medición de radiactividad ya que suma su efecto al de la muestra bajo medición. La lectura entregada por el instrumento corresponde, entonces, a un valor de *actividad bruta* expresada en cualquiera de las unidades mencionadas. Para transformarla en *actividad neta* es necesario restar dicho fondo.

Por otra parte, es importante aclarar que la desintegración radiactiva es un fenómeno de naturaleza estadística que responde a la distribución binomial y que puede ser aproximado por las funciones de distribución de Poisson y de Gauss. Aplicando esta última, puede considerarse que la totalidad de los valores de una serie de mediciones está comprendida en un intervalo de cinco desviaciones estándar centrado en el valor medio. Por lo tanto, para poder asegurar que dos mediciones pertenecen a distintas poblaciones, las mismas deberían diferir entre sí en cinco desvíos como mínimo.

Ese criterio se utiliza también para determinar si una muestra de baja actividad es realmente activa o si se está midiendo un valor perteneciente a la banda de fluctuaciones estadísticas del fondo natural. Es decir que una muestra contendría alguna sustancia radiactiva cuando su medición se diferencie del fondo en más de cinco desviaciones. De aquí se derivan los conceptos de límite de detección y de concentraciones mínima detectable y mensurable.

Lo antedicho es importante para comprender que ciertas lecturas que parecerían indicar la presencia de actividad cuando se las analiza superficialmente, resultan no ser más que fluctuaciones estadísticas del fondo natural al someterlas a un estudio cuantitativo.

Criterios de evaluación

En primera instancia los valores de actividad medidos en muestras se comparan con los correspondientes a una muestra de referencia y, mediante la aplicación de la prueba estadística de Student, se determina si entre sus respectivos valores medios existen diferencias significativas para el nivel de confianza seleccionado. Los resultados se expresan siempre en valores de concentración de actividad, es decir actividad por unidad de volumen.

Como criterio general, los resultados que se consideren estadísticamente distintos del fondo natural son comparados con los valores de concentración de actividad máximos permitidos dados por la Autoridad Regulatoria Nuclear en la “Norma Básica de Seguridad Radiológica” (AR 10.1.1).

Con referencia a los límites de concentración de radón aceptables, la “Norma Básica de Seguridad Radiológica” de la Autoridad Regulatoria Nuclear recomienda adoptar medidas especiales para reducir la presencia de radón en un ambiente cuando su concentración media anual en aire supere los 400 Bq / m³.

En lo concerniente al control de instalaciones, las áreas inspeccionadas pueden ser clasificadas en las cuatro categorías presentadas en la Tabla 1, de acuerdo con las tasas de dosis determinadas en cada una de ellas.

TABLA 1: CATEGORIZACION DE AREAS		
Categoría	Tasa de dosis (µSv / h)	Observaciones
A	< 2,5	Area de libre acceso para público y trabajadores
B	2,5 a 25	Area de libre acceso para trabajadores y limitado para el público
C	25 a 500	Area regulada
D	> 500	Area de alta radiación

Campañas de medición NORM

A partir de 1999 comenzaron las campañas de medición NORM, que luego se repetirían periódicamente, en los yacimientos de la empresa Pluspetrol. Ese año se trabajó en el yacimiento Centenario, agregándose en 2000 el área Porvenir (yacimientos El Porvenir, La Esperanza y Challacó- Provincia del Neuquén), en 2001 los yacimientos Ramos y Palmar Largo (provincias de Salta y Formosa) y en 2004 los yacimientos Aguada Baguales y Balbuena Este (ambos en Neuquén), totalizándose catorce campañas, hasta fines de 2004.

En forma previa a los trabajos de campo se seleccionaron una serie de puntos para la toma de muestras de agua superficial, subterránea y de producción en las que se determinaría la posible presencia de radioisótopos. También se designaron varios espacios de trabajo cerrados (oficinas,

salas de control, etc.) para la colocación de captadores de radón. Por último se eligieron las áreas en las que se medirían tasas de dosis.

Muestras de agua

En la primera campaña de medición, llevada a cabo en 1999 en el yacimiento Centenario, se tomaron 16 muestras de agua, sedimentos y plantas. Se incluyeron muestras de acuíferos tomadas en diversos pozos de observación, aguas superficiales y agua de producción. En posteriores campañas (años 2000, 2001, 2003 y 2004) sólo se midieron muestras de aguas superficiales y de producción.

El instrumento que se utilizó para medir radiación gamma en las muestras es un analizador multicanal que permite discriminar 8.192 valores de energía. Cuenta con programas de calibración en energías y de identificación de espectros gamma que facilitan la determinación de los distintos componentes radioisotópicos de la muestra.

Como ya se mencionó, la información entregada por el instrumento debe interpretarse en forma relativa tomando como referencia los valores correspondientes a una muestra de agua destilada medida a ese efecto. En la Figura 3 se observa el instrumental utilizado para medición de radiación gamma en muestras líquidas.

Para medición de radiación beta se empleó una cámara beta acoplada al correspondiente equipo electrónico. Los resultados se informan en concentración superficial de actividad (Bq / m^2) en razón de la baja penetración de las partículas beta.

Los espectros de radiación gamma natural obtenidos a partir de las muestras extraídas de los diversos yacimientos son similares a los que pueden hallarse en cualquier muestra de agua normal para consumo. Tampoco se encontró presencia de radioisótopos de origen antropogénico tales como cesio-137, iodo-131 o cobalto-60. El grado de sensibilidad del instrumental empleado asegura la detección de esos núclidos en caso de estar presentes aún en bajas concentraciones.

En todos los casos las mediciones de actividad beta se ubicaron bajo el límite de detección del instrumental empleado, es decir que sólo se midieron valores de fondo.

Es interesante mencionar que resultados similares se verificaron en las catorce campañas de mediciones NORM llevadas a cabo en seis yacimientos de la compañía Pluspetrol.

Muestras de aire

Para la medición de la concentración de radón en aire existen varias alternativas que utilizan instrumental y equipamiento de diversa complejidad. La adoptada por NOLDOR S.R.L. es la más



Figura 3: Instrumental para medición de radiación gamma en muestras líquidas.

sencilla y económica y por ello la que se adapta a los casos en los se requiere la toma de un gran número de muestras. Esta técnica implica el uso de pequeños captadores basados en carbón activado, material en el se fija el radón cuya concentración es luego cuantificada en laboratorio mediante la técnica de centelleo líquido.



Figura 4: Contador de centelleo líquido.

La toma de muestras de aire mediante captadores de radón se puso en práctica en el año 2000 durante la segunda campaña de medición en el yacimiento Centenario y la primera en El Porvenir habiéndose instalado cuatro de esos dispositivos en cada yacimiento. La experiencia se realizó también en 2001 en Ramos (6 captadores) y en Palmar Largo (4 captadores).

Los muestreadores se instalaron en oficinas, talleres, laboratorios, almacenes, salas de control y otros sitio susceptibles de acumular concentraciones relativamente elevadas de gas radón en aire.

La medición se efectuó por medio de la técnica de centelleo líquido que consiste en verter en el captador un producto denominado solución centelleadora que tiene la propiedad de devolver al medio en forma lumínica la energía transferida por las partículas beta emitidas por el gas radón. Un par de fotomultiplicadores se encargan de generar pulsos eléctricos en respuesta a la señal lumínica. La electrónica asociada procesa los pulsos almacenándolos en una memoria y presentándolos al usuario mediante periféricos apropiados. De esta forma puede reconstruirse el espectro beta original y cuantificar la actividad del radioisótopo (radón-222 en este caso) presente en la muestra. El equipo utilizado se muestra en la Figura 4.

Los resultados obtenidos en cada uno de los cuatro yacimientos se representan en el gráfico de la Figura 5 donde se incluye una barra en color verde con los datos provenientes de los promedios de 1.560 mediciones efectuadas por la Autoridad Regulatoria Nuclear en 12 ciudades argentinas. Como puede comprobarse los valores obtenidos en los yacimientos son totalmente comparables a los medidos en distintas localidades del país.

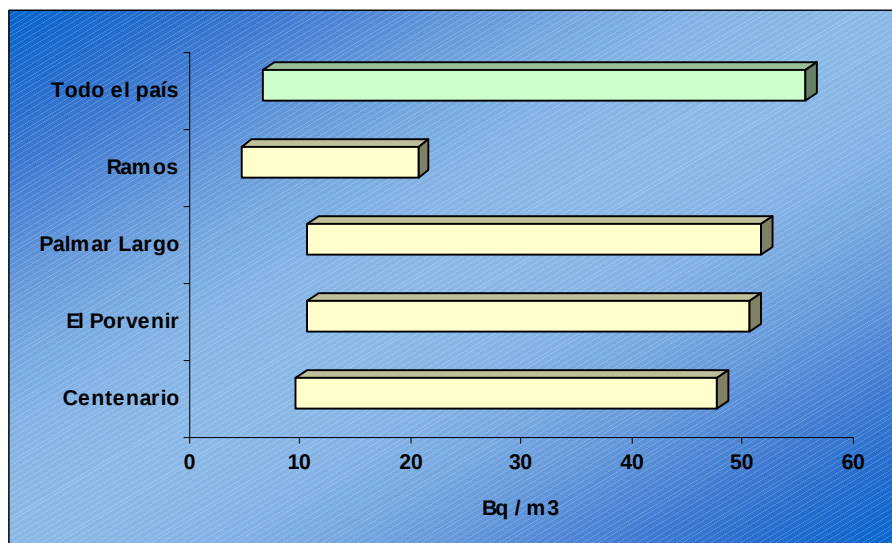


Figura 5: Mediciones de concentración de radón-222 en aire

Control de instalaciones

Este es el punto más importante dentro de un estudio de NORM ya que permite tener un resultado inmediato con respecto a los niveles de radiación gamma natural en distintos sectores de un yacimiento.



Figura 6: Monitores de radiación

En las catorce campañas de medición realizadas hasta la fecha se realizó un control integral de diversos elementos e instalaciones susceptibles de contener materiales radiactivos de origen natural.

Para ello se utilizaron tres tipos de monitores portátiles de radiación (Figura 6), a saber: un equipo de alta sensibilidad basado en un detector de centelleo para un control cualitativo y comparativo con respecto al fondo natural de la zona, dos instrumentos que emplean detectores tipo Geiger-Müller y están calibrado en unidades de dosis para cuantificar los resultados en aquellos casos en los que se detectaron niveles anormales de radiación y otros dos monitores con presentación digital también dotados de tubos Geiger-Müller.

Las mediciones se llevaron a cabo en distintas áreas de cada yacimiento poniéndose especial énfasis en aquellos puntos más susceptible de acumular NORM tales como bases de tanques y de separadores, codos, válvulas de distinto tipo, cruces de cañerías en general y colectores. A continuación se enumeran, a manera de ejemplo, algunos de los sectores o elementos considerados.

Baterías	Colectores
Satélites	Calderas
Bases de tanques	Cañerías en general
Separadores	Válvulas
Calentadores	Codos
Intercambiadores de calor	Cruces
Filtros	Depósitos de chatarra

Los resultados de cada campaña de medición fueron presentados en un cuadro en el que, para cada área, se indicaban los valores obtenidos en varios puntos de interés. Los resultados se presentaron ya sea como un promedio o bien como un pequeño rango de valores. Según los yacimientos bajo estudio se seleccionaron entre cinco y diez áreas.

La Tabla 2 presenta un resumen de las mediciones de tasa de dosis efectuadas en 396 áreas clasificadas de acuerdo con el criterio de categorización expuesto en la Tabla 1.

TABLA 2: CLASIFICACION DE LAS MEDICIONES DE TASA DE DOSIS					
Yacimiento	A	B	C	D	Total
Centenario (5 campañas)	131	40	2	0	173
El Porvenir (3 campañas)	97	9	0	0	106
Ramos (2 campañas)	37	0	0	0	37
Palmar Largo (2 campañas)	38	12	2	0	52
Aguada Baguales (1 campaña)	12	1	0	0	13
Balbuena Este (1 campaña)	13	2	0	0	15
Total	328	64	4	0	396

Cabe agregar que de los 328 datos ubicados en la categoría A, 222 corresponden a mediciones que no pudieron diferenciarse del fondo natural de radiación gamma.

Con referencia a aquellos puntos ubicados en la categoría C, los resultados específicos se presentan en la Tabla 3, en tanto que en el apartado “Análisis de Resultados” se realizarán las consideraciones pertinentes.

TABLA 3: PUNTOS CON MAYOR TASA DE DOSIS		
Yacimiento	Lugar	Tasa de dosis ($\mu\text{Sv} / \text{h}$)
Centenario	Depósito de chatarra	50
Palmar Largo	Calentador (periferia)	40
Palmar Largo	Calentador (base)	150

En las Figuras 7 a 12 se han clasificado las mediciones de tasas de dosis en seis intervalos diferentes para cada yacimiento.

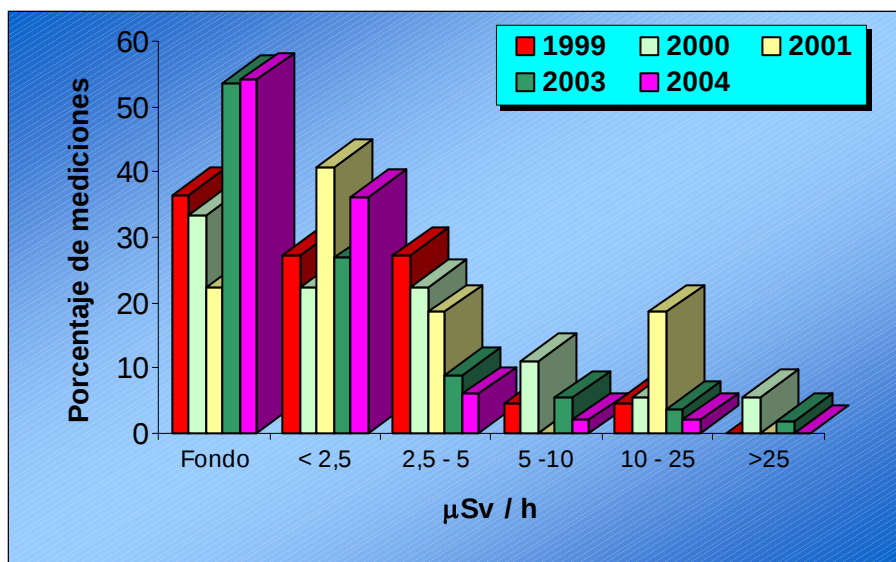


Figura 7: Clasificación de mediciones en el Yacimiento Centenario

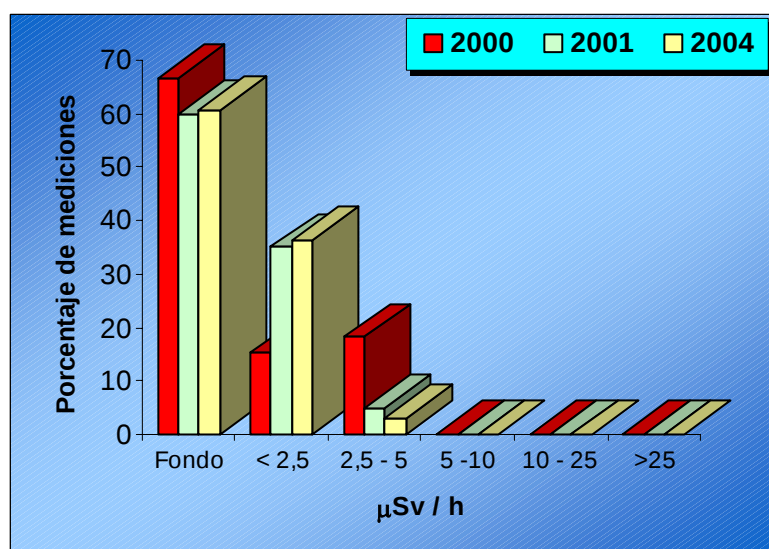


Figura 8: Clasificación de mediciones en el yacimiento El Porvenir

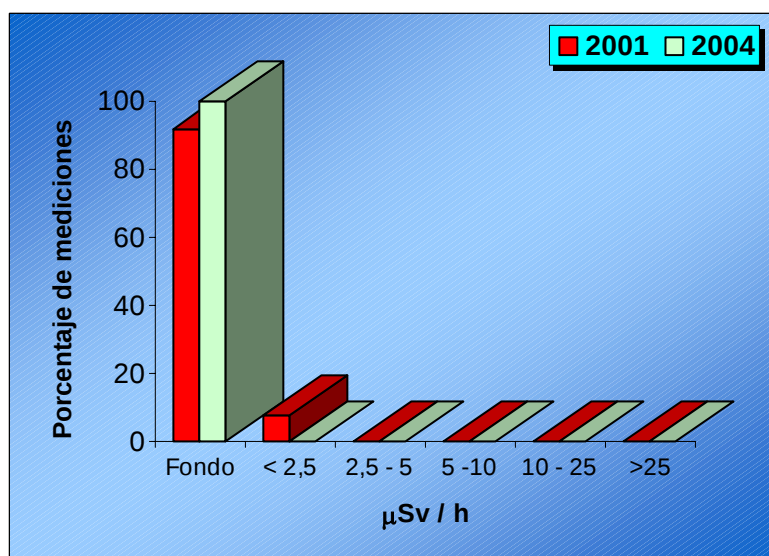


Figura 9: Clasificación de mediciones en el Yacimiento Ramos

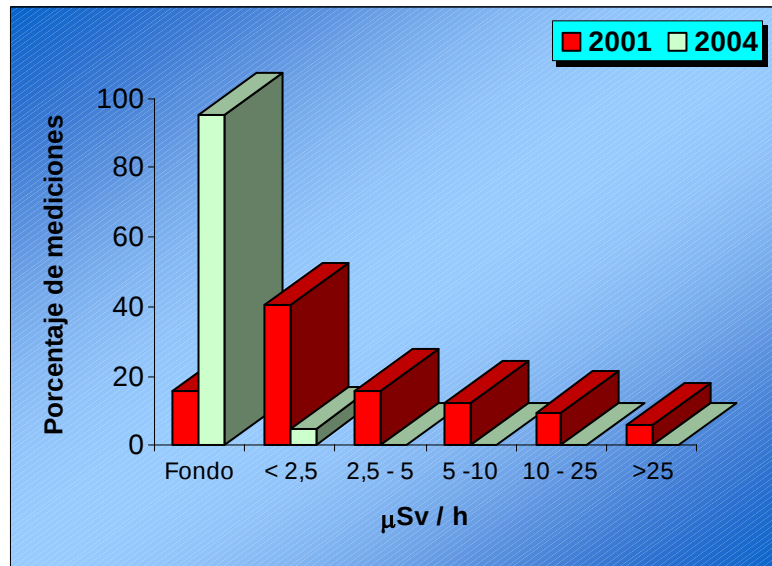


Figura 10: Clasificación de mediciones en el Yacimiento Palmar Largo

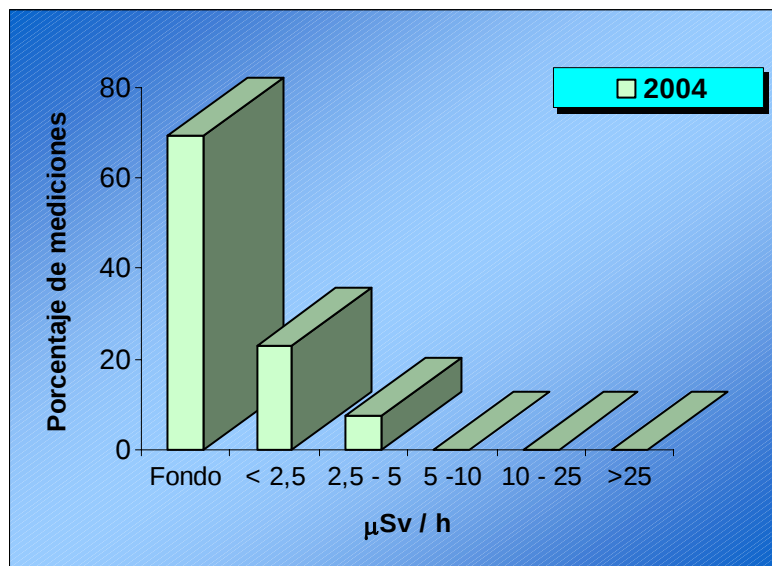


Figura 11: Clasificación de mediciones en el Yacimiento Aguada Baguales

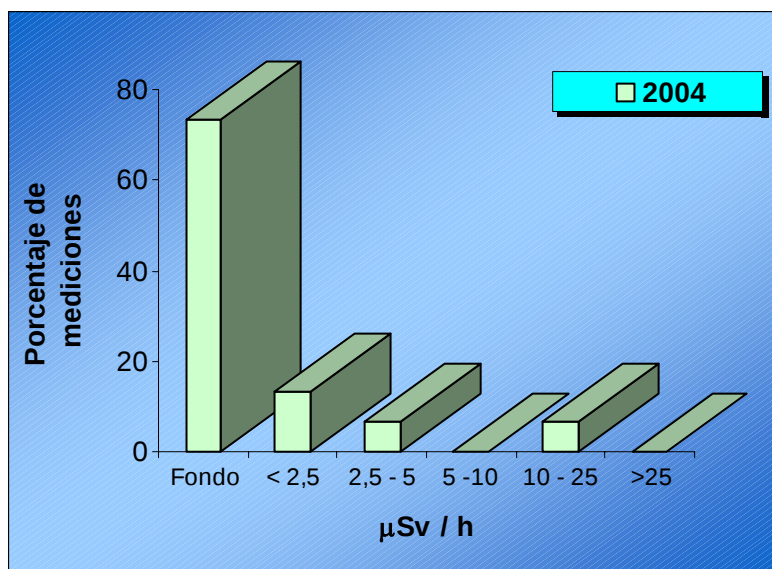


Figura 12: Clasificación de mediciones en el Yacimiento Balbuena Este

Análisis de resultados

Muestras

Tanto las muestras de aguas superficiales y subterráneas como las de vegetales y sedimentos presentaron valores de radiactividad similares a los encontrados en muestras del mismo tipo tomadas en cualquier parte del país, es decir que sus espectros gamma mostraron la presencia de radioisótopos naturales en concentraciones normales. En ningún caso se detectó la presencia de isótopos radiactivos artificiales.

En lo que concierne a las muestras de aire, los valores de concentración de radón son compatibles con los medidos en diversas localidades, tal como ilustra la Figura 5, y muy inferiores al límite de $400 \text{ Bq} / \text{m}^3$.

Además de las muestras mencionadas, se extrajeron incrustaciones de tramos de cañerías hallados en los depósitos de chatarra, tal como se observa en la Figura 13.

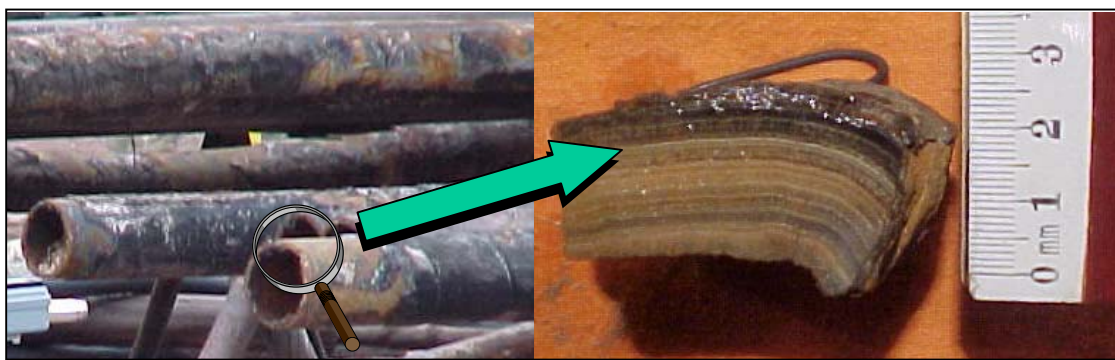


Figura 13: Muestras de incrustaciones

Las mediciones de las muestras de incrustaciones arrojaron como resultado una concentración superficial de emisores beta de $30 \text{ Bq} / \text{m}^2$ y valor de actividad gamma del orden de 80 veces superior al fondo natural, demostrando que la concentración de radioisótopos es muy elevada en la pared interna de las cañerías (“tubing”) utilizadas en los pozos. También se comprobó el incremento de la actividad con el espesor de las incrustaciones.

Instalaciones

Antes de efectuar un análisis particular para cada uno de los seis yacimientos estudiados se harán algunas consideraciones generales relativas a la magnitud de las dosis medidas.

En primer lugar, algo más del 56% de las mediciones realizadas no pudieron diferenciarse del fondo natural de radiación en tanto que un total del 83% fueron inferiores a $2,5 \mu\text{Sv} / \text{h}$, lo que implica que las áreas respectivas podrían considerarse como de libre acceso al público desde el punto de vista de la seguridad radiológica.

Por otro lado, las mediciones que resultaron mayores que $2,5 \mu\text{Sv} / \text{h}$ pero que no superaron los $25 \mu\text{Sv} / \text{h}$ fueron un poco más del 16% del total. Estas áreas deberían clasificarse como de acceso irrestricto para trabajadores pero restringido para el público desde el punto de vista de la seguridad radiológica. Sin embargo, los sectores involucrados son de por sí limitados al personal del yacimiento por razones de seguridad industrial, con lo cual casi el 99% de los sectores analizados no deberán cambiar su situación debido a la presencia de NORM.

Además, todas las mediciones fueron realizadas “en contacto” con el elemento, ya sea un codo, una válvula, la base de un tanque o cualquier otro elemento. Ahora bien, la intensidad de radiación disminuye con el cuadrado de la distancia, con lo cual con sólo alejarse del punto con fuerte presencia de NORM, las dosis recibidas disminuirán considerablemente.

A manera de ejemplo se analizará el mayor valor determinado en la primera campaña efectuada en el yacimiento Centenario correspondiente a un codo de 6” donde se leyeron hasta $20 \mu\text{Sv} / \text{h}$. Tomando como referencia el centro del tubo, puede calcularse la tasa a 50 cm de ese punto teniendo en cuenta su disminución en función del cuadrado de la distancia, como ya se expresó. Procediendo de esta manera, la tasa a 50 cm resultaría ser de $0,45 \mu\text{Sv} / \text{h}$ de acuerdo con el esquema de la Figura 14.

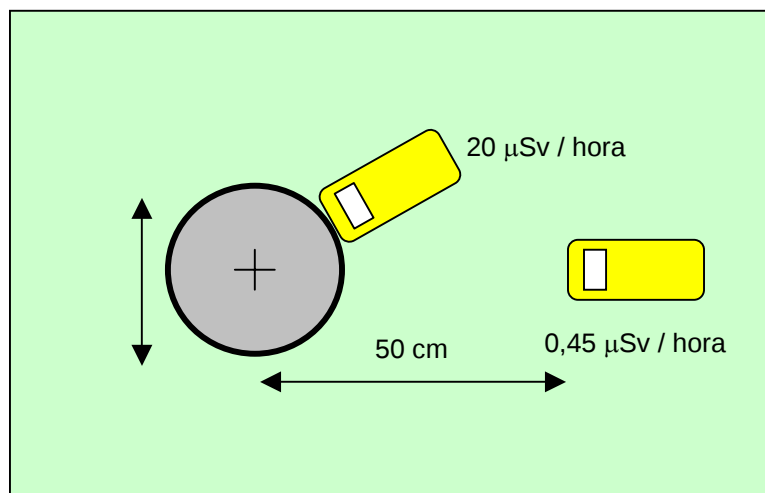


Figura 14: Efecto de la distancia sobre la tasa de dosis

El valor más crítico medido en el conjunto de las catorce campañas correspondió a un calentador ubicado en el yacimiento Palmar Largo donde llegó a medirse una dosis máxima de $150 \mu\text{Sv} / \text{h}$ con un promedio unos $30 \mu\text{Sv} / \text{h}$. Si bien este valor es realmente alto, tampoco debe exagerarse su importancia dado que la medición se efectuó en un lugar puntual ubicado en la parte inferior del calentador en la que es muy difícil que un operador permanezca durante lapsos prolongados. Por ello resulta más realista tomar como referencia el valor de $40 \mu\text{Sv} / \text{h}$ medido en la periferia lateral del calentador.

Como se expuso anteriormente, la máxima dosis permisible para trabajadores es de $20 \text{ mSv} / \text{año}$ como promedio de cinco años consecutivos, lo que implica que para alcanzar dicha cifra un trabajador debería permanecer en contacto con el calentador durante 500 horas al año o, tomando el mayor valor medido ($150 \mu\text{Sv} / \text{hora}$), debería permanecer acostado bajo ese dispositivo durante más de 133 horas anuales. Esta situación resulta muy improbable, sobretodo si se considera un total de 2.000 horas de trabajo anuales calculadas a partir de una jornada de 8 horas y dos semanas de vacaciones por año.

Yacimiento Centenario

Este es el yacimiento de la compañía que, en promedio, ha arrojado valores más elevados de NORM. Se obtuvieron valores de fondo en el 36%, 33%, 22%, 54% y 54% de las mediciones realizadas en las campañas de 1999, 2000, 2001, 2003 y 2004, respectivamente. Por su parte, el 24% de la totalidad de los valores registrados en las cinco campañas estuvieron por encima de los $2,5 \mu\text{Sv} / \text{h}$, registrándose un único caso superior a los $25 \mu\text{Sv} / \text{h}$ correspondiente al depósito de chatarra como se viera anteriormente en la Tabla 3. Los puntos con tasas de dosis comprendidas

entre los 2,5 $\mu\text{Sv/h}$ y los 25 $\mu\text{Sv/h}$ estuvieron relacionados con separadores, bases de tanques y algunos codos.

Comparando los resultados de las cinco campañas, puede afirmarse que los niveles de dosis en las distintas áreas monitoreadas se mantuvieron dentro de un rango de valores aproximadamente constante con una leve tendencia decreciente.

Yacimiento El Porvenir

El 72% de las mediciones efectuadas durante la campaña 2000, el 56% de las correspondientes a la campaña 2001 y el 61% de las correspondientes a la campaña 2004 arrojaron valores de fondo y sólo el 8% de la totalidad de los valores registrados en las tres campañas estuvieron por encima de los 2,5 $\mu\text{Sv/h}$.

En general, en aquellos puntos en los que se obtuvieron resultados superiores al fondo, los valores medidos en sucesivas campañas manifestaron una leve tendencia creciente en algunas de las baterías.

Yacimiento Ramos

En las dos campañas de medición llevadas a cabo en el yacimiento Ramos (años 2001 y 2004) todos los valores determinados fueron del mismo orden que el fondo natural de radiación gamma, incluso las mediciones efectuadas en los puntos más críticos como el depósito de chatarra. En este lugar sólo se detectó un leve incremento de la radiación de fondo con respecto a la existente en el resto del yacimiento.

Lo antedicho implica que, por el momento, no existe en el Yacimiento Ramos riesgo alguno relacionado con la presencia de radiactividad natural, NORM, ni para los trabajadores ni para el público en general.

Yacimiento Palmar Largo

En este caso también se llevaron a cabo dos campañas de medición durante 2001 y 2004 respectivamente. Si bien la mayor parte de los valores leídos fueron del orden del fondo natural de radiación, se registraron algunos resultados considerablemente elevados como los obtenidos en algunos separadores y tanques (entre 10 $\mu\text{Sv/h}$ y 20 $\mu\text{Sv/h}$) y, especialmente, la medición correspondiente a la base del ya mencionado calentador donde se obtuvo una lectura de 150 $\mu\text{Sv/h}$, el máximo registrado en las catorce campañas desarrolladas para la compañía Pluspetrol. Las consideraciones correspondientes se efectuaron en la introducción al presente punto por lo que no cabe realizar comentarios adicionales.

Yacimiento Aguada Baguales

Se realizó una única campaña de medición NORM en el año 2004. Casi el 70% de las mediciones correspondieron a valores de fondo, en tanto que en el 93% de los casos no se superaron los 2,5 $\mu\text{Sv/h}$. En el único punto en el cual este valor fue superado y, por lo tanto, correspondería asignarle la categoría B fue en la base de un tanque donde se midieron 3 $\mu\text{Sv/h}$.

Yacimiento Balbuena Este

Aquí también se realizó una única campaña de medición NORM en el año 2004 con resultados parecidos al yacimiento Aguada Baguales. En efecto, el 73% de las mediciones correspondieron a valores de fondo, en tanto que en el 87% de los casos no se superaron los 2,5 $\mu\text{Sv/h}$. Sin embargo, en este yacimiento se midieron 20 $\mu\text{Sv/h}$ en una cañería anexa a un tanque de almacenamiento.

CONCLUSIONES

Los resultados de los análisis de muestras de agua indican concentraciones de actividad normales en función de la naturaleza, estado y características generales de los materiales estudiados, con valores de concentración de actividad inferiores a los 10 Bq / Kg. Las muestras que se tomaron como referencia son indicadores confiables y seguros para una interpretación relativa de los resultados.

Al respecto, resulta interesante comparar los valores de concentración de actividad correspondientes a las muestras tomadas de los yacimientos (es decir valores prácticamente iguales a los de fondo) con el contenido natural de emisores beta y gamma en algunos materiales. Esto se ilustra en la Figura 15.

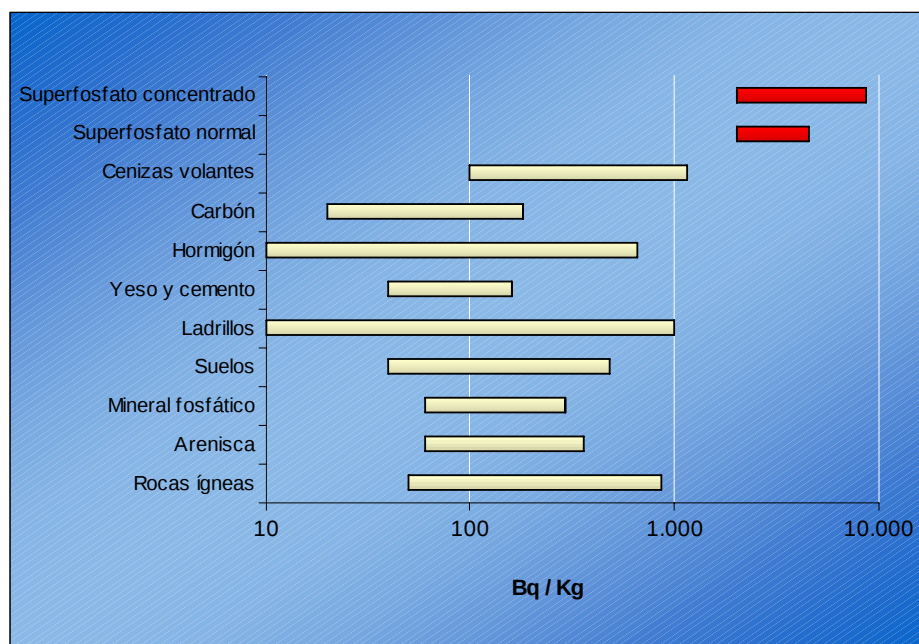


Figura 15: Concentración de emisores beta y gamma en diversos materiales

Es de destacar la elevada concentración de emisores beta y gamma en superfosfatos, teniendo en cuenta que estas sustancias son utilizados en la producción de fertilizantes y, por lo tanto, incorporados al medio ambiente en forma cotidiana.

Por otra parte, la concentración de radón en aire resultó ser, en el peor de los casos, diez veces inferior al límite de intervención establecido por la autoridad nacional competente.

Las tasas de exposición fueron, en un 83% de los puntos medidos inferiores a los 2,5 $\mu\text{Sv} / \text{h}$, límite para el libre acceso de público en general de acuerdo con la Tabla 1 (categoría A), en tanto que sólo el 1% de las mediciones sobrepasó el límite para trabajadores (25 $\mu\text{Sv} / \text{h}$).

Lo anterior implica que, si bien se detectó presencia de NORM en numerosos puntos, su magnitud no resulta alarmante. Con respecto a aquellas instalaciones en las que se midieron valores inusualmente altos, la dosis acumulada que en ellos podría recibir el personal resulta inferior a los límites establecidos por la Autoridad Regulatoria Nuclear teniendo en cuenta el bajo tiempo de permanencia en esas áreas.

De todas maneras, según la Tabla 1, dichas instalaciones deberían considerarse como “área regulada” y, por lo tanto, deberían de estar señalizadas con un cartel indicador de presencia de radiactividad. La decisión de colocar esta señal o no debe tomarse luego de evaluar todos los

aspectos positivos o negativos de hacerlo, incluyendo el posible impacto psicológico en los operarios y en el marco de referencia presentado en el párrafo anterior.

Los altos valores de dosis medida en esos dispositivos deben atribuirse a la presencia de una gran cantidad de incrustaciones en su interior. Por ello, antes de efectuar operaciones de reparación, limpieza o arenado internos, es importante optimizar los procedimientos para minimizar las dosis a las que estará sometido el personal interviniente. Debe considerarse, además, que las dosis en el interior serán mayores que las externas, donde la presencia de las estructuras que forman parte del calentador tienen el efecto de blindar la radiación gamma proveniente de las incrustaciones, reduciendo la dosis medida en la cara externa de la pared. Es posible, también, que la concentración de radón-222 en el interior sea muy alta por lo que se resulta conveniente ventilar adecuadamente los dispositivos involucrados antes de trabajar en su interior. Finalmente, durante esas operaciones debe evaluarse el riesgo de inhalar o ingerir polvo contaminado procedente de las incrustaciones.

Más allá de estos casos puntuales, no resulta por el momento necesario tomar precauciones especiales en ningún área de los yacimientos controlados. A pesar de esto, no debe descuidarse el problema de la presencia de radioisótopos naturales en yacimientos, sino que sus instalaciones deben ser sometidas a un control periódico sobretodo teniendo en cuenta que se ha detectado una tendencia creciente en las tasas de dosis medidas a lo largo de las sucesivas campañas.

Reseña final

Los principales aportes emanados de las campañas de medición de NORM descritas en el presente trabajo pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Los niveles de radiactividad presentes en cañerías, bombas o válvulas son función del espesor de las incrustaciones. Por lo tanto, las mediciones de dosis aportan una información adicional relativa a la prevención de eventuales taponamientos o alteraciones de flujo en dichos elementos. Esto es extensivo a fondos de tanques, separadores, calentadores y otros dispositivos donde la presencia de elevadas actividades es un indicador de altos niveles de sedimentación y de la posible necesidad de operaciones de limpieza.
- La técnica de medición de radón-222 mediante captadores pasivos ha demostrado ser muy efectiva. Los resultados obtenidos contribuyen a evaluar el grado de circulación y calidad de aire en ambientes de trabajo con deficiente renovación de aire.
- Las mediciones de concentración en muestras de aguas superficiales y subterráneas, suelos y muestras biológicas (plantas), brindan un elemento de juicio adicional al momento de evaluar la presencia de indicadores de impacto ambiental generados a partir de la actividad petrolera. Estas mediciones pueden ser incorporadas a los planes de gestión ambiental de cada una de las áreas de producción.
- Resulta evidente la necesidad de efectuar mediciones puntuales en cada oportunidad en la que se realice la limpieza interna de dispositivos tales como separadores o calentadores donde el polvo radiactivo proveniente de las incrustaciones puede ser aspirado por los operarios. En estos casos también se hace necesaria la toma de medidas preventivas de seguridad radiológica para evitar la contaminación interna o externa y la irradiación del personal. Como regla general, los responsables de higiene y seguridad deberían tener muy en cuenta los posibles efectos de los radioisótopos naturales sobre los trabajadores. Para tener una idea clara de la situación en cada yacimiento resulta imprescindible la realización periódica de campañas de medición de NORM.
- Los resultados de las catorce campañas desarrolladas en los seis yacimientos demostraron que los valores de dosis están distribuidos en un amplio rango. Si bien la mayor parte de ellos no pudieron diferenciarse del fondo natural hubo algunos realmente elevados que merecen un seguimiento periódico.

1. BIBLIOGRAFIA

- 1- "Norma Básica de Seguridad Radiológica". AR 10.1.1. Autoridad Regulatoria Nuclear Argentina, 1995
- 2- "Bulletin on Management of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Oil & Gas Production". API Bulletin E2. American Petroleum Institute, 1992.
- 3- "A Guide to NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials) in Texas Petrochemical Industry". TCC Environmental Health Committee. Texas Chemical Council, 1992
- 4- "Naturally Occurring Radioactive Materials: the Next Step". E.C. Thayer, L.M. Racioppi. SPE 23500. Society of Petroleum Engineers, 1991.
- 5- "Environmental, Health and Safety Decision Making for Naturally Occurring Radioactive Materials in Producing Operations Using Pathway Exposure Analysis". H.T. Miller, L.M. Cook. SPE 23381. Society of Petroleum Engineers, 1991.
- 6- "Evaluating the real Risks of Radioactive Scale in Oil and Gas Production". G. Reed, B. Holland, A. McArthur. SPE 23383. Society of Petroleum Engineers, 1991.
- 7- "Radon determination by activated charcoal adsorption and scintillation measurement" A.C. Canoba, F.O. López, A.A. Oliveira. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 240, N°1, 1999.