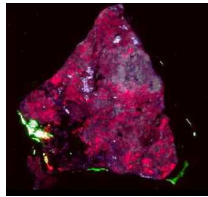


“Je suis de ceux qui pensent que la science a une grande beauté. Un savant dans son laboratoire n'est pas seulement un technicien, c'est aussi un enfant placé en face de phénomènes naturels qui l'impressionnent comme un conte de fées.”

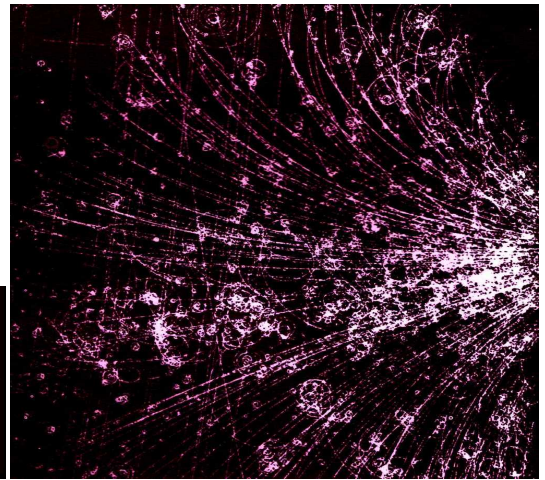
[“Soy de quienes piensan que la ciencia tiene una gran belleza. Un científico en su laboratorio no es sólo un técnico, es también un niño frente a fenómenos naturales que le impresionan como un cuento de hadas.”]

Maria Salomea Sklodowska-Curie (1929)

PROSPECCIÓN RADIOMÉTRICA



Axinita fluorescente.



Radiación de partículas (imagen CERN)

Cuando nació Maria en 1867 Varsovia y gran parte de Polonia pertenecían al Imperio ruso –mientras que el sur (donde nació **Isidor Rabi**) estaba bajo el Imperio austrohúngaro y el oeste formaba parte del Reino de Prusia, esencia del que poco después sería el Imperio alemán: *Deutsches Reich*–. Maria era la menor de cinco hermanos. Tenía diez años cuando la tuberculosis le quitó a su madre. Tres años antes su hermana mayor había muerto por tífus. Maria ya tenía pensamiento crítico y le resultó evidente que Dios estaba pintado. Se volvió agnóstica.

Dado que la universidad oficial estaba prohibida para las mujeres, cursó estudios en una sede universitaria clandestina que tenía el *bonus* de conservar la lengua y cultura polacas que los sucesivos zares rusos también habían prohibido con brutal autoritarismo –como el dictador Franco con la lengua y cultura catalanas, y mil casos más–. (La palabra царь –zar– como también en alemán *kaiser*, provienen de César, latín *caesar*).

Hizo el secundario en un colegio de señoritas y luego empezó a ganar unos rublos dando clases particulares.

En 1890 **Maria Sklodowska** se mudó a la capital francesa, donde ya vivía una de sus hermanas, y al año siguiente ingresó a la parisina Universidad de la Sorbona (fundada en 1257) para continuar sus estudios en química, física y matemática. Logró sobrevivir con los escasos francos que recibía de una beca, hasta que pudo



Université de la Sorbonne (foto pantheonsorbonne.fr)

comenzar a desempeñarse en un laboratorio. Al año siguiente, 1894, ya laureada, se cambió de laboratorio: fue a colaborar con **Pierre Curie**. Cuando Pierre le propuso matrimonio, Maria le dijo que *Oui!*, pero que deseaba regresar a Polonia. Pierre aceptó ir con ella, pese a que profesionalmente no le convenía a ninguno de los dos. Maria fue a averiguar las posibilidades laborales en la Universidad de Cracovia: le dijeron que las mujeres no tenían nada que hacer allí. Entonces volvió a París, y desde 1895 fue más conocida como Marie Curie –los *franchutes* eran menos conservas, pero el apellido del marido obvio que debía aplicarse–.

La radiactividad fue descubierta por el francés **Henri Becquerel** en 1896: había dejado sales de uranio sobre

una placa fotográfica (lámina de vidrio recubierta de emulsión fotosensible) dentro de un cajón a oscuras en un lluvioso día parisino y, *Voilà!*, un par de días después notó que en parte se había velado. Becquerel (hijo y nieto de físicos) también descubrió que la emisión radiactiva atacaba los tumores. Años después obtuvo el Nobel.

Maria Sklodowska y **Pierre Curie** en 1899 hallaron otros dos elementos radiactivos: el polonio (así llamado por la patria de Maria) y el radio (del latín *radius*, rayo, y de ahí radiactividad, radiometría y demás).

Marie llegó a ganar dos premios Nobel (física y química), algo que sólo otros tres investigadores han logrado

hasta hoy. Pierre obtuvo el Nobel en física. Y lo mismo conseguiría Irène, la mayor de sus dos hijas, quienes desde temprana edad quedaron huérfanas de su padre: en 1906 Pierre fue atropellado por un carro tirado por caballos: parece que en la París de aquellos años el tráfico ya empezaba a ser un peligro...

Durante la Primera Guerra Mundial Marie e Irène decidieron ir al frente a sacar radiografías a los heridos. (El alemán **Wilhelm Röntgen** había descubierto en 1895 los rayos X al radiografiar la mano de su esposa, hoy también usados para densitometría ósea). Marie falleció en 1934, a los sesenta y seis años, ya ciega como consecuencia de la leucemia adquirida por su reiterada exposición a las radiaciones. Las palabras arriba citadas, que ella repetía ante sus alumnos, ilustran la maravillosa sensibilidad que tenía esta gigante de la ciencia.

Irène dejó Francia tras la invasión nazi, refugiándose en Suiza (país neutral). Otros se fueron a Estados Unidos, tales los casos de **Enrico Fermi** (emigrado de Italia en 1938, luego de recibir el premio Nobel de física por investigaciones sobre irradiación neutrónica, creación de isótopos y reacciones nucleares, debido a la amenaza que representaba el fascismo para su esposa judía), **Niels Bohr** (premio Nobel de física en 1922 por sus descubrimientos sobre la estructura atómica, hijo de madre judía, que huyó en 1943 de su Dinamarca natal tras la ocupación nazi), **Leo Szilard** (judío húngaro que huyó de Berlín en 1933), **Albert Einstein** (premio Nobel de física en 1921, judío alemán que emigró en 1932 ante el inminente ascenso del nazismo y que en 1939 fue convencido por sus colegas de escribir una carta al presidente Roosevelt para promover el proyecto atómico antes que los nazis) y otros (como **Isidor Rabi**, judío polaco emigrado siendo niño) quienes bajo la dirección de **Julius Oppenheimer** (estadounidense, hijo de un judío alemán) directa o indirectamente colaboraron con el Proyecto Manhattan para desarrollar las bombas de fisión nuclear de uranio (${}_{92}\text{U}^{235}$) y plutonio (${}_{94}\text{Pu}^{239}$) que luego serían lanzadas sobre las mujeres, niños y ancianos de Hiroshima y Nagasaki –para aplastar incondicionalmente al atroz régimen enemigo, evitar muertes de soldados estadounidenses y ocupar Japón antes que los soviéticos–. Todos estos científicos manifestaron luego su pesar ante tanta monstruosidad.

Las posteriores bombas de fusión de hidrógeno y su variante neutrónica afortunadamente no han masacrado gente.



Prueba nuclear en el atolón Bikini, islas Marshall, 1946, tras expulsar a sus aborígenes (foto U. S. Navy)

PROCESOS RADIATIVOS

La radiactividad es la facultad de emisión de radiaciones (alfa, beta, gamma) que poseen los núcleos de ciertos elementos químicos inestables llamados radiactivos, que al hacerlo transmutan en otros elementos (diferente cantidad de protones o número atómico Z, por lo que también difiere el número másico A) o bien en otros **radionúclidos o isótopos** (del griego ἴσος, isos: igual; τόπος, topos: lugar) del mismo elemento (igual Z pero distinta cantidad de neutrones, por lo que sólo difiere A), que pueden resultar inestables o estables. Es un **proceso estocástico** (aleatorio para átomos individuales) y son radiactivos todos los elementos naturales de número atómico alto, a partir del polonio (Po, Z=84), aunque también algunos isótopos del bismuto (${}_{83}\text{Bi}^{214}$), del plomo (${}_{82}\text{Pb}^{210}$, ${}_{82}\text{Pb}^{214}$) y muchos otros entre los de menor número atómico, hasta inclusive el tritio (${}_{1}\text{H}^3$).

La **actividad radiactiva** es el número de átomos desintegrados por segundo, una característica propia de cada sustancia. Se cuantifica en **Becquerel (Bq)** o **Curie (Ci)**: $1 \text{ Bq} = 1 \text{ desintegración/segundo.gr}$ $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$

Las modificaciones de un determinado elemento radiactivo dependen del número de átomos desintegrados y de la proporción entre cantidad de sustancia transformada y existente.

Siendo N_0 el número de átomos de la sustancia radiactiva existentes en un instante t_0 y N los presentes en un instante posterior t la velocidad de desintegración será:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N, \quad \text{donde } \lambda \text{ es la } \textbf{constante de desintegración},$$

es decir el descenso de radiactividad por unidad de tiempo

de modo que: $\frac{dN}{N} = -\lambda dt$, e integrando: $\ln N = -\lambda \cdot t + K$

Puede calcularse el valor de K, dado que en el instante inicial, cuando $N = N_0$ y $t = t_0$ resulta: $K = \ln N_0$

Entonces: $-\lambda \cdot t = \ln N - \ln N_0 = \ln \frac{N}{N_0}$ y tomando el **período de semidesintegración** $t_{1/2}$, o sea el tiempo necesario para que la cantidad de átomos iniciales se reduzca a la mitad,

resulta: $-\lambda \cdot t_{1/2} = \ln \frac{1}{2} = -0,693$ De modo que: $t_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$

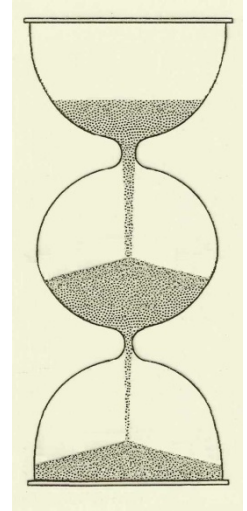
La **vida media** τ es la inversa de la constante λ , es decir que: $t_{1/2} = 0,693 \tau$

En una **serie de isótopos** que van desde un elemento radiactivo inicial a uno estable final puede definirse el equilibrio radiactivo al cabo de un tiempo suficiente para que se hayan llegado a formar los primeros átomos estables.

La cantidad de átomos de un isótopo en una serie que se encuentra en equilibrio radiactivo resulta inversamente proporcional al tiempo de vida media de dicho isótopo:

$$\frac{N_1}{\tau_1} = \frac{N_2}{\tau_2} = \dots = \frac{N_n}{\tau_n}$$

La cantidad de granos de un compartimiento en un reloj de arena o clepsidra múltiple, una vez alcanzado el equilibrio, resulta inversamente proporcional al diámetro del cuello que les permite caer. Lo mismo se da con la cantidad de autos en un cuello de botella del tránsito, aunque no sea la clase de vida media que quisiéramos tener. (De paso, clepsidra viene del griego κλέπτειν –kléptein, robar–, de donde cleptómano, e ὕδρο (hidro), agua– porque al inicio no fueron de arena sino de agua “robada” de a gotas).



DATACIONES

Ahora bien, dado que, $-\lambda \cdot t = \ln \frac{N}{N_0}$ entonces, $\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$ y $N_0 = N \cdot e^{\lambda t}$

El número de átomos hijo D_c producidos por el decaimiento del elemento padre inicial N_0 será:

$$D_c = N_0 - N \quad \text{por lo que,} \quad D_c = N \cdot e^{\lambda t} - N \quad \text{y} \quad D_c = N (e^{\lambda t} - 1)$$

El número total de átomos hijo en cualquier tiempo es: $D_T = D_0 + D_c$

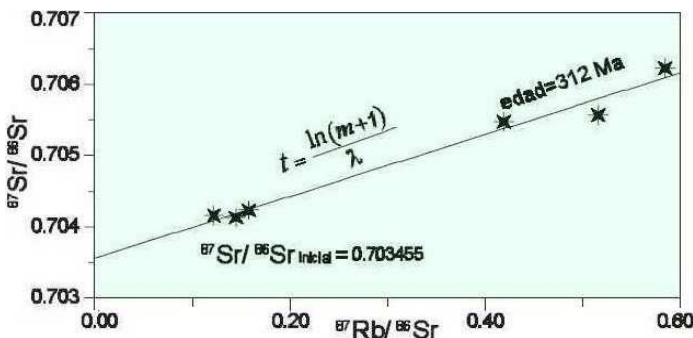
(siendo D_0 aquellos ya preexistentes en el instante inicial de formación de la roca, por decaimientos previos)

Entonces, $D_T = D_0 + N (e^{\lambda t} - 1)$ –que es la ecuación de una recta–

Despejando resulta: $t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{D_T - D_0}{N} + 1 \right)$

Por lo tanto, **la proporción de isótopos radioactivos transmutados desde la formación de la roca o fósil que los contiene es proporcional al tiempo t transcurrido.**

Y este es el fundamento de la **geocronología absoluta** –a diferencia de otros muchos métodos de datación relativa–, partiendo de los estudios pioneros de **Bertram Boltwood** en 1907 en Estados Unidos, después intensamente desarrollados por el inglés **Arthur Holmes**, quien en 1913 calculó en $1,6 \cdot 10^9$ años la edad de la Tierra (un número muy elevado para la expectativas de la época), la cual fue estirando él mismo con estudios cada vez más ajustados hasta llevarla en 1944 a valores cercanos a los actualmente aceptados.



(modificado de Hernández-Bernal *et al.*, 2000)

A la izquierda puede observarse el diagrama de una isócrona (línea que une puntos de igual edad) a partir de datos de Rb/Sr. Resulta evidente el arreglo lineal de los puntos que representan a varias rocas cogenéticas, donde la edad de la roca es directamente proporcional a la pendiente de la recta y la ordenada al origen proporciona el valor inicial de Sr^{87}/Sr^{86} .

Obsérvese que tanto en las abscisas como en las ordenadas los isótopos padre (Rb^{87}) e hijo (Sr^{87}) han sido divididos por un isótopo estable y bastante

abundante del elemento hijo (Sr^{86}), circunstancia que no altera el resultado de los cálculos antes vistos y permite obtener la cantidad del isótopo hijo inicial D_0 llevando la recta hasta la ordenada al origen, es decir el cociente isotópico Sr^{87}/Sr^{86} para el caso de no existir Rb^{87} a partir del cual pudiera crearse Sr^{87} por desintegración radiactiva, o sea que en esa instancia de tiempo inicial el Sr^{87} preexistente (cantidad D_0) debió tener otro origen (incluso seguramente a partir de una cierta porción de Rb^{87} anterior a ese suceso), pero no provino del isótopo padre N_0 que a partir de la formación de esa roca ha ido generando por decaimiento la cantidad D_c .

Si los puntos de la isócrona corresponden a distintos minerales, se trata de una edad de enfriamiento promedio, pero si corresponden a la roca total, la edad se refiere a la última homogenización isotópica de la roca sin importar eventuales procesos metamórficos.

Existen otras series isotópicas empleadas para hacer dataciones (Sm-Nd, Lu-Hf, K-Ar, U-Pb; tabla en pág.232), así como otros métodos de cálculo y diversas técnicas de cuantificación isotópica de muestras en laboratorio.

Las concentraciones de isótopos radiactivos han variado a lo largo de la historia terrestre, hecho que ha sido

documentado, como así también las diferencias composicionales entre la Tierra y el sistema Solar original: el CHUR (*chondritic uniform reservoir* o reservorio condritico uniforme), cuya denominación obedece a que los meteoritos denominados condritas son representativos de la materia original del sistema Solar, a su vez muy similar al manto terrestre primigenio. También se ha ido ajustando un modelo sobre las variaciones entre distintas porciones de nuestro planeta, por ejemplo la mayor abundancia relativa de plomo en el núcleo (por la marcada tendencia de éste a formar sulfuros) y en cambio la escasez de uranio, que fue mayormente segregado hacia el manto y la corteza. Otras muchas consideraciones geoquímicas exceden el tema aquí abordado.

Termoluminiscencia: La palabra luminiscencia (de *lumen*, lumbre en latín) fue acuñada en 1888 por el alemán **Eilhard Wiedemann** y la hay de distintos tipos. (Luz viene de *lux* y recuérdese que lux, lumen y candela son unidades de iluminación del S.I.). La luminiscencia térmica, descubierta ya en 1663 por el inglés **Robert Boyle** (el de la ley de presión del gas, y no sólo) es una propiedad eléctrica de muchos minerales: la emisión de luz de un sólido aislante o semiconductor al ser calentado –aparte de la incandescencia al quemarse–.

La radiación ionizante (cósmica, α , β , γ , así como rayos X y catódicos) al incidir sobre un material hace que los electrones y sus huecos queden retenidos en imperfecciones de la red cristalina (trampas) entre las bandas de conducción y valencia. A mayor tiempo de exposición a la radiación, mayor cantidad de electrones y huecos que podrán quedar así retenidos. Al calentar el material los electrones y huecos se liberan, deshaciéndose el sólido del exceso de energía adquirida y emitiendo los fotones que visualizamos. Esto acontece en la fluorita, apatita, calcita y otros minerales.



Termoluminiscencia variable en muestras de fluorita (fotografías Julien Simon)

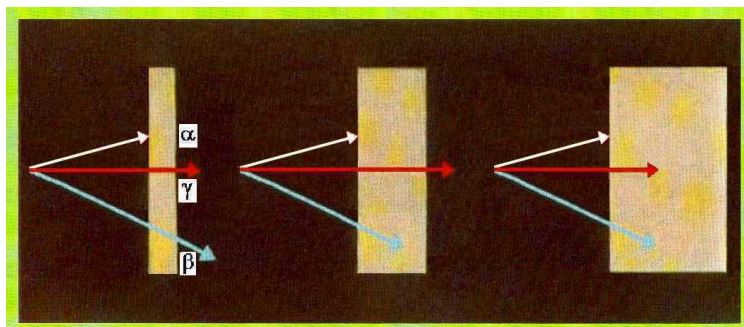
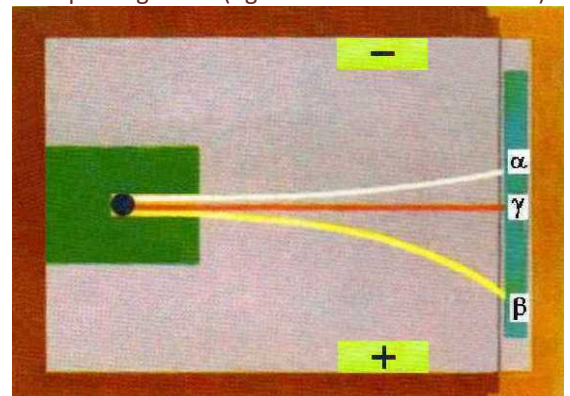
La termoluminiscencia se emplea para dataciones absolutas, dado que la cantidad de luz emitida aumenta en función del período de tiempo que la muestra dispuso para absorber y producir huecos. El

inglés **Martín Aitken** en 1964 comenzó con su aplicación para arqueología (hogares, cerámicas) y luego otros lo han hecho para sedimentos, lavas, depósitos carbonáticos, etc. Las muestras deben tener edades de entre 1.000 y 500.000 años; no aplica más que al Pleistoceno superior y Holoceno. El mineral más utilizado para datar es el cuarzo por su abundancia y porque los rayos cósmicos que llegan constantemente a la superficie terrestre producen cambios acumulativos en su estructura cristalina. La unidad empleada para cuantificarlo es el gray, igual a un joule de radiación absorbida por cada kg de materia. (**Louis Gray** fue un inglés pionero en el estudio de los rayos X). Entonces, al calentar una muestra a temperatura superior a 500°C, ésta emite una luz tanto más intensa cuanto mayor ha sido la radiación recibida –o sea mayor el tiempo transcurrido– para que los granos de cuarzo vuelvan a la normalidad energética. Se calibra la escala temporal por comparación con otras dataciones previas y ha de tenerse presente que también influirán las emisiones α , β y γ –que ahora describiremos– de los posibles minerales radiactivos de la propia muestra.

TIPOS DE RADIACIONES

El neocelandés **Ernest Rutherford** (gran jugador de rugby, como debía ser) descubrió en Cambridge en 1900 los tres tipos básicos de radiación **emitidas por el núcleo atómico** (y logró el premio Nobel) por la experiencia de desviación dada por un imán entre la placa fotográfica y el bloque de plomo taladrado donde se situaba el elemento radiactivo (figura a la derecha),

Desviación de partículas α , β y γ por acción de un campo magnético (figuras modif. de Salvat GT)



Esquema ilustrando la distinta penetración de las partículas α , β y γ .

viendo la distinta desviación de las partículas. El gráfico de la izquierda ilustra la capacidad de penetración relativa de las radiaciones a causa de su distinta naturaleza: máxima en las γ , media en las β , mínima en las α .

Alfa (α): Núcleos de helio, ${}^2\text{He}^4$ (2 protones, 2 neutrones: carácter corpuscular y carga positiva) lanzadas a una velocidad del 5 al 20% de la luz en el vacío (**c**) por fisión espontánea, escapando a la fuerza nuclear fuerte. Por ser relativamente masivos su poder de penetración es bajo (no atraviesan una hoja de papel) y por lo mismo su poder de ionización es alto (100 veces más que las β y 10.000 más que las γ), andan “chocándose” fácilmente con los átomos y les arrancan un electrón, son como un elefante en un bazar.

Beta (β): Electrones, $-1e^0$ (carga negativa, masa reducida, carácter corpuscular), emitidos a una velocidad del 40 al 99,9% de **c** por la disociación de un protón del núcleo, mutándolo a neutrón y eyectando también un antineutrino (masa similar al electrón, sin carga y con espín levógiro), escapando a la fuerza nuclear débil. Por su pequeño tamaño poseen mayor poder de penetración que la radiación α (para detener la β se requiere, por ejemplo, de una madera de algunos cm de espesor) pero es menor su poder de ionización. (En la radiación β^+ un neutrón da protón+positrón+neutrino; y en la **captura electrónica** electrón+protón dan neutrón+neutrino).

Gamma (γ): De tipo electromagnético (fotones, sin carga ni masa, viajando a la velocidad de la luz), su poder ionizante es más reducido, pero no nulo, y la capacidad de penetración es muy elevada (son detenidas por varios cm de plomo). Su emisión es el resultado de un reajuste energético del núcleo de isótopos inestables. Su frecuencia ($f > 10^{19}\text{Hz}$, $\lambda < 10^{-11}\text{m}$), y por tanto su energía, son muy altas.

Radiación de Neutrones ($0n^1$): El neutrón y su radiación fueron descubiertos en 1932 por el inglés **James Chadwick** a partir de los experimentos del alemán **Walther Bothe** (premios Nobel ambos) y las inferencias del italiano **Ettore Majorana** (joven genio desaparecido misteriosamente en 1938, suicidado o improbablemente fugado hacia Buenos Aires). Rara en la naturaleza, la radiación neutrónica ocurre en el proceso de fisión espontánea como el caso del ${}^{87}\text{Br}^{35} \Rightarrow {}^{87}\text{Kr}^{36} + 0n^1 + \beta$. También se la puede inducir artificialmente, lo cual se aplica a herramientas de perfilaje de pozo. Para altos números atómicos los neutrones tienen mayor capacidad de penetración que los rayos γ y únicamente los detiene una gruesa barrera de compuestos ricos en hidrógeno.

Rayos Cósmicos: En 1909 el jesuita y físico alemán **Theodor Wulf** inventó el primer electrómetro (aparato para medir la tasa de producción de iones dentro de un contenedor herméticamente sellado) y al emplearlo en la parisina torre Eiffel descubrió que los niveles de radiación ionizante arriba eran mayores que abajo. Dos años después el italiano **Domenico Pacini** observó variaciones simultáneas de la tasa de ionización en la superficie de un lago y del mar, así como a 3 metros bajo la superficie. De la disminución verificada bajo el agua, Pacini razonó que una parte de la ionización se debe a fuentes independientes de la radiactividad terrestre.



Victor Hess, 1912, aterrizaje del globo (foto American Physical Society)

Uno de los tanques con detectores de rayos cósmicos en Malargüe (foto Observatorio Pierre Auger)



Posteriormente el austríaco **Víctor Hess** halló que la radiación aumentaba con la altura, tras enviar detectores sobre globos-sonda desde los Alpes tiroleses en 1912, por lo que dedujo que ésta provenía del cielo. Consiguió el Nobel, al igual que el estadounidense **Robert Millikan**, quien años después los llamó rayos cósmicos al registrar que en su mayor parte provenían de fuera del sistema Solar. La densidad de la atmósfera hace que su decaimiento suceda predominantemente a una altura de unos 20 km, creando un estrato de partículas cargadas conocido como Máximo de Pfozter, por el físico alemán **Georg Pfozter** que lo descubrió en 1936.

En Malargüe desde el año 2004 funciona el Observatorio Internacional de Rayos Cósmicos que fue bautizado en honor a **Pierre Auger**, el físico francés que en 1938 formuló la teoría de las lluvias cósmicas. Son 1.600 tanques de agua que tienen sistema de espejos y detectores fotomultiplicadores, a lo que se agregan detectores de luz azul de Cherenkov. (**Pavel Cherenkov** fue el físico ruso que descubrió el fenómeno y obtuvo el Nobel en 1958). Esa luz destella cuando una partícula se mueve en medios transparentes a una velocidad mayor de la

que corresponde a la luz en dicho medio. Allí se descubrió que gran parte de los rayos de más alta energía provienen de fuera de la Vía Láctea y una buena porción quizá de la ergósfera exterior al agujero negro del núcleo de una galaxia de la constelación del Centauro. Rayos de menor energía proceden de las tormentas solares y de otras estrellas. En conjunto se trata de partículas subatómicas de dos tipos: rayos primarios (protones, partículas α y en menor medida electrones y otras) y secundarios, resultantes de la interacción de los primarios con la atmósfera (muones –electrones pesados inestables– neutrones y fotones).

Los rayos X son de origen extranuclear, a diferencia de los anteriores, originados por el frenado de un haz de electrones, por ejemplo contra un blanco metálico, produciendo fotones a partir de la energía cinética, con una frecuencia entre el UV y los rayos γ .

SERIES RADIATIVAS

A la derecha se despliegan algunas de las series radiactivas de mayor utilidad para prospección (caso de las tres primeras) o para geocronología (todas, aunque no es tan usada la del $^{90}\text{Th}^{232}$). Se indica la radiación emitida en cada etapa.

Además del $^{92}\text{U}^{238}$, también el $^{92}\text{U}^{235}$ es radiactivo y tiene una serie con diversos isótopos intermedios, pero existe menos del 1% respecto al primero, por lo cual no suele ser importante en actividades exploratorias.

EFFECTOS DE LAS RADIACIONES

Son tres, que aquí se describen.

Producción de Pares de Iones: cuando una partícula radiactiva entra en un medio gaseoso puede impactar con alguno de los átomos que lo componen, generándose entonces un par de iones primarios de signo contrario: el electrón arrancado (anión) y el resto del átomo (catión, con una carga positiva que ahora no está compensada).

Con dos electrodos, con una diferencia de potencial a fin de otorgarles suficiente energía cinética, se produce una avalancha de pares de iones secundarios, que será acusada en los receptores. **Marie Curie** entendió cabalmente esto que antes había observado **Henri Becquerel**.

Como quedó dicho, la radiación α es la más efectiva para producir ionización, siendo bastante menor la producción de pares de iones en el caso de las β y muchísimo menor en el caso de las γ .

Efecto Fotoeléctrico: el alemán **Heinrich Hertz** fue quien descubrió imprevistamente este efecto que llevaría a cuestionar la teoría ondulatoria en la que él creía. Le resultó desconcertante que la chispa entre dos esferas de metal se volviera más brillante por aumento de descarga eléctrica (fotoelectricidad) cuando una de ellas era iluminada con luz ultravioleta. Hertz enfermó y murió a los treinta y seis años, antes de que se descubriese el electrón, cosa que en 1899 hizo el inglés **Joseph Thomson** a partir del estudio de los rayos catódicos, concluyendo que la luz UV provocaba la emisión de electrones –cuya carga fue medida por **Robert Millikan** en 1909 en U.S.A. mediante un ingenioso experimento con gotas de aceite–. En 1902 el húngaro **Philipp Lenard** descubrió que también ocurría efecto fotoeléctrico entre dos placas metálicas dentro de un tubo de vidrio en vacío, porque la luz UV aporta a los electrones la energía necesaria para vencer el potencial de contacto con el metal (trabajo de extracción) y atravesar el espacio que los separa de la otra placa, completando el circuito. Se

SERIES RADIATIVAS NATURALES				
Elemento	Núm. de masa	Número atómico	Periodo de semidesintegración	Radiación
Serie del uranio 238				
U	238	92	$4,5 \times 10^9$ años	α
Th	234	90	24 días	β
Pa	234	91	6,7 h, 1,2 min (2 isómeros)	β
U	234	92	$2,5 \times 10^5$ años	α
Th	230	90	8×10^4 años	α
Ra	226	88	1 620 años	α
Rn	222	86	3,8 días	α
Po	218	84	3 minutos	99,97 % α , 0,03 % β
Pb	214	82	26,8 minutos	β
At	218	85	2 segundos	α
Bi	214	83	20 minutos	99,96 % β , 0,04 % α
Po	214	84	$1,6 \times 10^{-4}$ segundos	α
Tl	210	81	1,3 minutos	β
Pb	210	82	22 años	β
Bi	210	83	5 días	β
Po	210	84	138 días	α
Pb	206	82		$8\alpha + 6\beta$
Serie del torio 232				
Th	232	90	$1,4 \times 10^{10}$ años	α
Ra	228	88	6,7 años	β
Ac	228	89	6,1 hora	β
Th	228	90	1,9 años	α
Ra	224	88	3,64 días	α
Rn	220	86	54,5 segundos	α
Po	216	84	0,16 segundos	α (alternativamente un poco de β)
Pb	212	82	10,6 horas	β
Bi	212	83	1 hora	63 % β , 37 % α
Po	212	84	3×10^{-7} segundos	α
Tl	208	81	3,1 minutos	β
Pb	208	82		$6\alpha, 4\beta$
Serie del potasio 40				
K	40	19	$1,2 \times 10^9$ años	β (90 %) o captura de electrón de órbita K
Ca	40	20		
o Ar	40	18		
Serie del samario 147				
Sm	147	62	$1,4 \times 10^{11}$ años	α
Nd	143	60		
Serie del rubidio 87				
Rb	87	37	6×10^{10} años	β
Sr	87	38		
Serie del carbono 14				
C	14	6	5 600 años	β
N	14	7		

(modificado de Howell, 1962)

dedujo entonces la existencia de una frecuencia umbral de la luz incidente por debajo de la cual no hay emisión de fotoelectrones, cualquiera sea la intensidad de la luz y el tiempo de exposición. Superado ese umbral, los electrones se emiten instantáneamente con independencia de lo débil que sea el haz luminoso, en contra de lo años antes planteado por el escocés **James Maxwell**. La energía de los fotoelectrones aumenta con la frecuencia de la luz incidente. En 1905 el alemán **Albert Einstein** abordó el efecto fotoeléctrico proponiendo la teoría cuántica: la energía lumínica no está distribuida de forma continua como en una onda, sino de manera discreta, en cuantos indivisibles de energía, o sea que generalizó la cuantificación que su compatriota **Max Planck** (Nobel en 1918) ya había planteado en 1900. Según Planck, la energía E_f de un fotón está dada por: $E_f = h \cdot f$

(siendo f la frecuencia ondulatoria y h la constante de Planck, igual a $6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s ó $4,135 \cdot 10^{-15}$ eV.s)

Einstein postuló que en las interacciones entre luz y masa, la energía se intercambia mediante la absorción o emisión de un cuanto luminoso que luego el estadounidense **Gilbert Lewis** llamaría fotón. Cuando un rayo γ (fotón) incide sobre la superficie de un metal o fibra de carbono puede transmitirle íntegramente su energía a los electrones de dicha superficie. Estos electrones podrán escapar atravesando la energía potencial que poseían. Como la energía del fotón depende de la frecuencia, existirá un valor límite de ésta (el umbral de frecuencia fotoeléctrico) a partir del cual con frecuencias inferiores no habrá emisión de electrones.

A partir de Max Planck, **Albert Einstein** estableció que también podemos expresar que: $E_f = \phi + \frac{1}{2} m_f \cdot v_f^2$

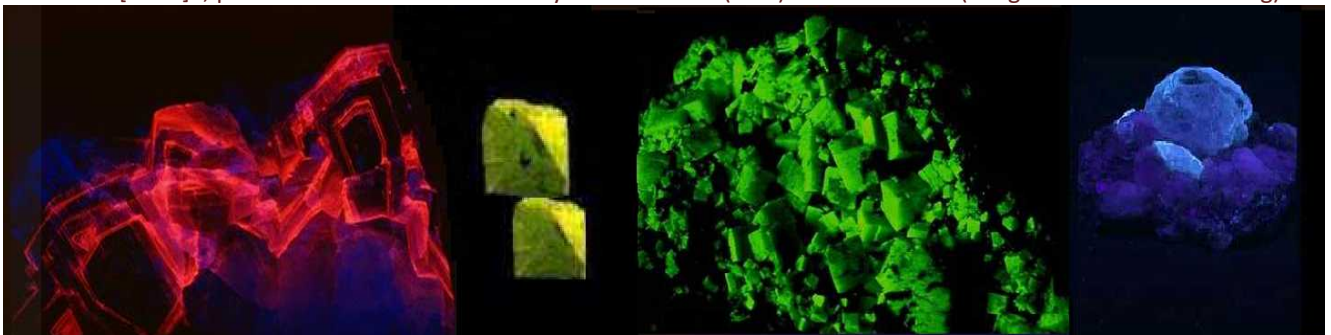
(donde m_f y v_f son la masa y la velocidad del fotón incidente –considerándose nula la m_f dado su carácter ondulatorio– y ϕ es el trabajo de extracción, es decir, la energía disponible para intentar extraer un electrón de la superficie a impactar)

Desde la fórmula y los conceptos antedichos, puede expresarse matemáticamente que: $\phi = h \cdot f_0$

(siendo f_0 el umbral de frecuencia fotoeléctrico, esto es, la frecuencia mínima para conseguir la extracción de un electrón, o sea producir efecto fotoeléctrico)

Entretanto, **Ernest Rutherford**, ya Nobel y gran promotor de la ciencia en su Nueva Zelanda natal, descubrió el protón en 1918, que en verdad ya había sido inferido por el alemán **Eugen Goldstein** por experiencias y deducciones hechas entre 1886 y 1899. Indemne a la radiactividad, Rutherford murió en Cambridge a los sesenta y seis, tras operarse una hernia que se le abrió podando los árboles de su casa.

Imágenes de minerales fluorescentes: desde la izquierda, calcita –CO₃Ca, no radiactiva–, zircón con torio –ZrSiO₄[ThO₂]–, pechblenda o uraninita –UO₂– y berilo –Be₃Al₂(SiO₃)₆– a la derecha (imágenes de uvminerals.org)



Efecto Compton: es el responsable de la **fluorescencia**, que ocurre cuando se hace incidir un haz de rayos UV (fuera del espectro visible), cuyo choque genera radiaciones de menor frecuencia que en muchas sustancias son visibles. La **fosforescencia** es una emisión similar, pero diferida en el tiempo. Ambas son **fotoluminiscencias**.

Este efecto fue descubierto por el estadounidense **Arthur Compton** en 1923 cuando, haciendo incidir un haz de rayos X sobre la superficie de materiales como grafito y parafina, comprobó la dispersión de éstos, resultando la frecuencia emergente menor que la del haz incidente, otra contradicción con la teoría ondulatoria. Adoptó entonces una explicación cuántica del fenómeno, interpretando la modificación de la frecuencia en los rayos difundidos como un choque elástico entre el electrón y el fotón (con un comportamiento corpuscular para el cual puede plantearse una m_f no nula). Sucede que en el choque el fotón pierde una cantidad de energía, queda medio rengó, pero no palma, sino que se reinventa como otro de menor frecuencia.

Retornando a la fórmula de Einstein, puede escribirse ahora que: $E_f = \phi + \frac{1}{2} m_f \cdot v_f^2 = h \cdot f_0 + h \cdot f'$

El término $h \cdot f'$ representa la energía del nuevo fotón que emerge, siendo $f' < f_0$

Siempre en 1923, el francés **Louis de Broglie** (otro Nobel, al igual que Compton) generalizó la dualidad onda-corpúsculo al caso de los electrones, asignándoles una onda asociada ficticia. Pero antes y después hubo más.

OTROS CUANTOS SUCESOS

El concepto de ἄτομοι (átomos: indivisible) como unidad material lo debemos al griego **Demócrito de Abdera** (circa 420 a.C.). Más de dos milenios después, entre 1803 y 1807, el inglés **John Dalton** –mientras algunos de sus connacionales invadían Buenos Aires– retomó el concepto pero atando el átomo a datos modernos de la física. Un siglo después, en 1902, el estadounidense **Gilbert Lewis** propuso un átomo cúbico y en 1904 el inglés **Joseph Thomson** planteó un sabroso modelo tipo budín con pasas (que eran los electrones incrustados entre la nube de harina positiva). En 1911, ya con mucha más data, el kiwi **Ernest Rutherford** propuso el modelo atómico base que ha seguido hasta hoy, que fue sucesivamente ajustado y mejorado por el danés **Niels Bohr** en 1913 (primer modelo cuántico, con los números n que definen el tamaño de cada orbital) y por el alemán **Arnold Sommerfeld** en 1916. Éste planteó que el momento angular (L) del átomo de hidrógeno está cuantizado y sólo puede tomar los valores $|L| = \hbar[l(l+1)]^{1/2}$ (siendo $l = 1, 2, \dots, n-1$ con la constante reducida de Planck $\hbar = h / 2\pi$) y la componente vertical del momento (L_z) también está cuantizada según $L_z = \hbar m$ (siendo el número cuántico magnético $m = -1, -1+1, \dots, 0, \dots, l-1, l$). Es como con las teclas de un piano, que se puede hacer sonar un do o un do sostenido, pero nada intermedio. Bohr descubrió el primer espectro, el del hidrógeno: el salto electrónico a un nivel de energía más bajo (por calor o campos EM) produce la emisión de un fotón de cierta frecuencia, y el total de emisiones permite distinguir a qué elemento químico pertenece el átomo mediante su conjunto de líneas espectrales registradas. Luego, en 1924 el austríaco **Erwin Schrödinger** asoció a cada nivel de energía varias posibles funciones de onda, lo que implica que puede haber distintos tipos de orbitales con sus niveles y subniveles energéticos. Eran años vertiginosos en la investigación física básica.

El inglés **Paul Dirac** fue un gran genio, humilde, humanista, ateo y de lenguaje escueto y preciso. Una vez le preguntaron sobre poesía y contestó: *"en ciencia uno intenta decir a la gente, de una manera en que todos lo puedan entender, algo que nunca nadie supo antes. La poesía es exactamente lo contrario"*. Sus colegas acuñaron una unidad, el *dirac*, para la cantidad mínima de palabras que se podían decir en una conversación. Dirac halló en 1926 que la mecánica de funciones de onda propuesta por **Erwin Schrödinger** y la mecánica matricial planteada por los alemanes **Max Born** y **Werner Heisenberg** eran formalmente equivalentes y podían unificarse en una única teoría general para explicar la dualidad onda-corpúsculo. Born había descubierto que el cuadrado del valor de la función de onda define la probabilidad de encontrar a la partícula en un punto e instante dados, porque basta conocer esa función para estimar con un margen de error estadístico la posición particular y no hace falta saber la historia previa del sistema. De ahí la **interpretación de Copenhague** que dio en 1927 Bohr (nativo de dicha capital danesa) en una conferencia en Como (norte de Italia).

La interpretación de Copenhague plantea que la dinámica determinista de Newton (la posibilidad concreta de conocer simultáneamente posición y velocidad de una partícula para saber cómo seguirá su camino) no aplica a escalas subatómicas, algo que Einstein se resistía a creer: *"Dios no juega a los dados"*. Pero Heisenberg demostró que en el marco de la física cuántica no podemos prever cómo caerán los dados.

El **principio de incertidumbre o indeterminación de Heisenberg** sostiene que, si x es una coordenada de posición de la partícula y p_x es su momento lineal en x , el producto de su indeterminación es mayor o igual que la constante reducida de Planck dividida dos. Es decir: $|\Delta x| \cdot |\Delta p_x| \geq \hbar / 2$. O sea que si se pudiera determinar con exactitud por ejemplo la posición, aumentaría la indeterminación del momento lineal (y por tanto de la velocidad) hasta igualar o superar la magnitud límite indicada ($5,27 \cdot 10^{-33}$ J.s ó $3,29 \cdot 10^{-14}$ eV.s). La fórmula anterior es equivalente a: $|\Delta E| \cdot |\Delta t| \geq \hbar / 2$. Significa que no es posible determinar simultáneamente y sin errores el valor exacto de la energía de un proceso y el momento en que éste ocurrirá.

El principio de incertidumbre determina, entre otras minucias fundamentales, la **corta vida de los bosones masivos** W y Z , cuyo intercambio da origen a la **fuerza nuclear débil**, y ésa es la razón por la cual **el alcance de esta fuerza física básica no va más allá del núcleo atómico**: las partículas se evaporan tan rapidísimo que, incluso disparadas a la velocidad c , no pueden llegar más lejos que 10^{-18} m (aunque el proceso también le sucede a los leptones pesados, como el muón, igual de rápido estando fuera del núcleo). Y, por el mismo principio, la **fuerza nuclear fuerte** –la que evita que el núcleo se desparrame a causa del rechazo eléctrico entre los protones y más fundamentalmente mantiene unidos a los tres quarks que conforman cada neutrón o cada protón–, si bien su alcance en este caso es mayor, **también está limitada al perímetro nuclear** debido a que las partículas mediadoras entre los quarks (**gluones**) **expiran en cortísimos lapsos de tiempo**, no pudiendo llegar con vida más allá de 10^{-15} m (por suerte, porque si no todos los núcleos atómicos del cosmos se habrían enredado en un único hipermaxisupermegagigantónucleo universal y entonces el Barba ¡otra que 6 días para confeccionar todo!: ¡aún estaría viendo cómo miércole desanudar semejante madeja enmarañada!

El modelo atómico fue completado por la **electrodinámica cuántica**, llamada "la joya de la física" por su gran

poder predictivo. Fue desarrollada desde 1948 por el japonés **Shin'ichirō Tomonaga** en Tokio y por los estadounidenses **Julian Schwinger** en Harvard y el brillantísimo **Richard Feynman** en California, poniéndole así el moño a todo este paquete conceptual.

APARATOS DETECTORES

➤ Los primeros aparatos usados en prospección fueron:

- **Electroscopio:** luego del primero de aguja de **William Gilbert** (1600) fue diseñado con láminas de oro por el francés **Jean Nollet** (1748) y otros. Se descarga tanto más rápido cuanto mayor es la radiación ambiente que ioniza el aire.

- **Placas fotográficas:** en las que la emulsión de bromuro de plata (AgBr) se reduce a plata negra según la intensidad de la radiación. (El esloveno **Janez Puhar** en 1841 y otros iniciaron el desarrollo de la fotografía –obvio que para otro fin– que reemplazaría al daguerrotipo de **Louis Daguerre**).

- **Spintariscopio** (σπινθήρ, spintír: destello; σκοπέω, scopéo: mirar en griego): ideado por el inglés **William Crookes** (1903), caja cerrada con una placa de cristales de blenda (ZnS) donde se ponía la muestra, que si era radiactiva hacía que la blenda emitiera destellos, visibles desde el ocular.

Crooks inventó también el **tubo de rayos catódicos** que décadas después fue la base de los televisores antiguos (CRT, Cathode Ray Tube) y de varios aparatos detectores de radiación que referiremos a continuación.

- **Cámara de ionización:** desarrollada desde 1896 por **Wilhelm Röntgen**, **Henri Becquerel** y otros, usada en prospección desde 1913. Es un tubo de vidrio o metal con gas en su interior (aire, metano, argón u otro) donde, si entra radiación ionizante, ocurre desplazamiento de iones creando un camino conductor entre el ánodo y el cátodo. El pulso eléctrico puede oírse como chasquido en los auriculares. Opera con tensión de 100 a 500 V.

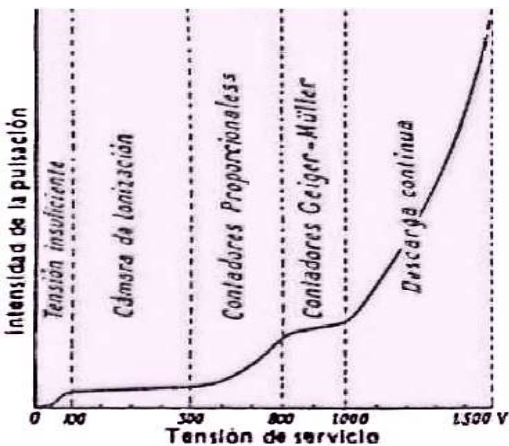
➤ Los siguientes son los aparatos más modernos:

- **Contador Geiger-Müller:** fue pergeñado en 1928 por los alemanes **Hans Geiger** y **Walther Müller** a partir de la cámara de ionización, pero, a diferencia de ésta, trabaja con tensiones más altas, de entre 800 y 1.000 V (comparación abajo y figura a la derecha). Tiene una entrada de radiaciones al tubo (semejante al de la cámara) las cuales colisionan con los átomos del gas allí contenido (metano y argón).

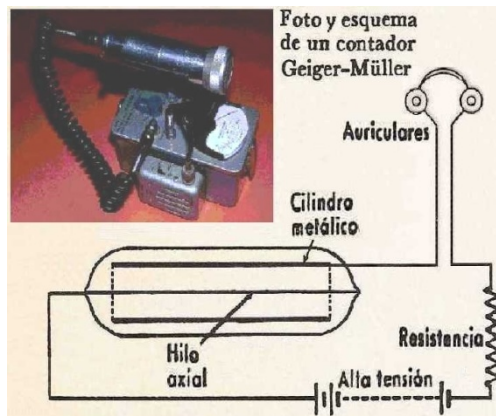
Esto genera la **expulsión de electrones en avalancha**, que son ahí registrados como una única pulsación, independientemente de la cantidad de energía inicial de la radiación, no siendo posible la distinción de distintas clases de emisión, pero asegura tener buenas respuestas en presencia de niveles bajos de radiación.



Exploración de Uranio, 1944, Canadá, con cámara de ionización (foto Natural Resources Canada)



Voltaje vs Intensidad en distintos detectores (modificado de Cantos Figuerola, 1972)



(imagen Universidad de Extremadura)

- **Contador Proporcional:** similar al anterior, trabaja a menor voltaje (500 a 800 V), por lo cual se produce un **menor efecto multiplicador de electrones**. La producción de pares de iones depende esencialmente de la energía de la radiación captada y entonces es capaz de distinguir tipos variables de emisión, siempre que no sean de muy baja intensidad. La ventana de ingreso de las radiaciones consiste en una interfaz que permite entrar sólo la radiación deseada, sea α , β o γ . Si, por ejemplo, se desea prospectar radiación beta, se impide la entrada de las otras dos al tubo y el aparato recibe el nombre de **betámetro**.

- **Centellómetro o destellómetro** (scintillation counter): inspirado en el spintariscopio de Crookes, fue inventado por el irlandés **Samuel Curran** en 1944 como parte del Proyecto Manhattan. Posee un fotocátodo, un

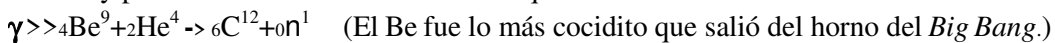
tubo fotomultiplicador, una cámara de destellos y un registrador electrónico. El fotocátodo consiste de cristales de moléculas de determinada sustancia denominada fósforo, que puede ser inorgánico como yoduros (NaI, CsI u otros, casi siempre activados con Tl), u orgánico como antraceno, naftaleno, etc. En algunos átomos de estas moléculas, al llegar una cierta radiación, se excitan algunos de sus electrones, ceden energía para volver a su estado normal y entonces emiten radiación EM en la frecuencia de la luz visible: los **destellos característicos del efecto Compton**, que pueden visualizarse en la cámara de destellos (figura a la derecha). Pero además **el fotocátodo emite electrones** (por efecto fotoeléctrico) **hacia el interior del tubo fotomultiplicador**. Éste es un sistema amplificador de señal que consiste en una sucesión de ánodos con potencial eléctrico creciente, en cada uno de los cuales, ante la llegada de cada electrón, se emiten múltiples electrones secundarios, lo cual desencadena un efecto en cascada, hasta el último ánodo (colector), donde se realiza el **registro electrónico de la pulsación resultante**, proporcional a la radiación total detectada.

Al igual que en los contadores proporcionales, también en los centellómetros una interfaz absorbente a la entrada del dispositivo permite seleccionar el tipo de radiaciones a prospectar; por ejemplo para detectar radiación γ se filtran las α y β .

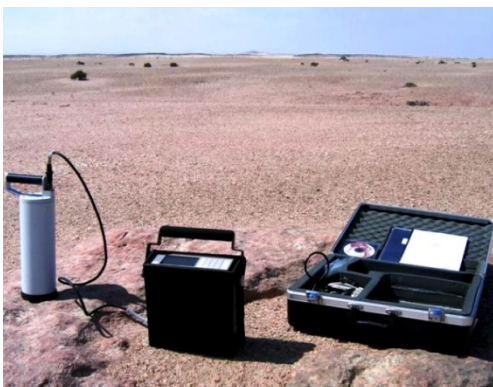
Los centellómetros comenzaron a utilizarse en **prospección aérea** en la década de 1950, sobre todo en Canadá, junto con magnetómetros y algunas veces en combo con dispositivos electromagnéticos de emisor y receptor móviles.

- **Emanómetro:** es un centellómetro modificado para la detección del gas radón y sus isótopos, utiliza un fósforo, que suele ser SZn activado con Ag. Tiene una trampa neumática para la captura de los gases emanados del suelo, canalizados por un pequeño tubo que manualmente se hinca en el terreno.

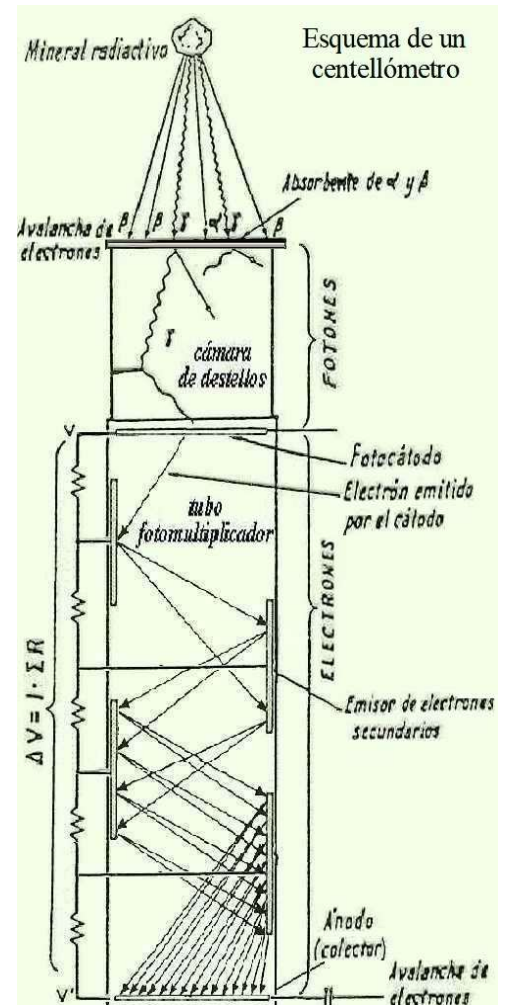
- **Berilómetro:** consta de un centellómetro y un emisor de antimonio radioactivo (^{124}Sb) cuyos rayos γ , en caso de alcanzar berilo $-\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6-$ u otros minerales con berilio (Be), los excitan y producen la emisión de neutrones que entonces se detectan:



- **Espectrómetro de rayos γ :** ideado por **Robert Pringle, Kenneth Roulston y George Brownell** en 1949 en Canadá, fue efectivamente desarrollado hacia 1960 en ese mismo país. Permite identificar los isótopos emisores de los rayos γ midiendo la energía con que éstos arriban al aparato. Actualmente existen dos tipos principales: Los más **convencionales** (siguiente foto) están contruidos sobre la base de un centellómetro de NaI (Tl) al que se ha acoplado un sistema electrónico de analizador multicanal que formatea la sucesión de pulsos arribados según el número de cuentas/segundo en ordenadas y canales o ventanas (W_1, W_2, \dots) de muestreo (rangos de energía en MeV) en abscisas (véase la primera figura de la página siguiente).



Espectrómetro de rayos γ Exploranium GR 320 (foto earthmapsconsulting.com)



(modificado de Cantos Figuerola, 1972)

Los de **mayor resolución** –y mayor costo– poseen un detector de un material semiconductor, también llamado de estado sólido (alguna aleación de cadmio o preferentemente germanio puro). Con la llegada de rayos γ al detector (que allí pueden producir efecto fotoeléctrico, efecto Compton o ionización) se provoca un movimiento de electrones desde la banda de valencia hacia la banda de conducción del semiconductor, lo que en presencia de un campo eléctrico genera un desplazamiento hacia el ánodo, resultando en una variación de tensión que registra y formatea el **analizador multicanal**. Los canales de muestreo pueden ser 512, 1.024, hasta 16.384, según la capacidad de resolución del aparato.

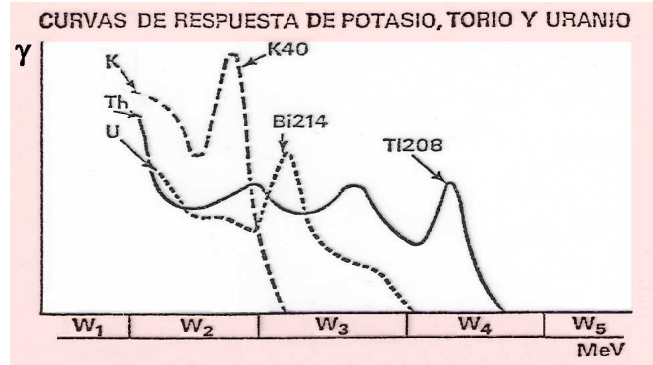
Así, visualizando los picos en el espectro, se consigue la identificación de los tres elementos radiactivos comúnmente prospectados por su abundancia, a través de la radiación del isótopo que es más fácilmente identificable en su correspondiente serie, es decir su “equivalente”. Tenemos entonces:

- $^{92}\text{U}^{238}$, a través del $^{83}\text{Bi}^{214}$, con una ventana energética situada entre 1,66 y 1,86 MeV

- $^{90}\text{Th}^{232}$ a través del $^{81}\text{Tl}^{208}$, con una energía que va de 2,41 a 2,81 MeV

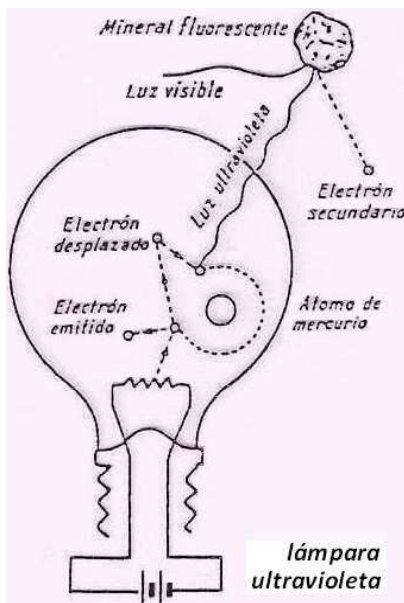
- $^{19}\text{K}^{40}$, a través de sí mismo ya que es el único isótopo radiactivo de su serie, 1,37 a 1,57 MeV

Además, como ruido pueden detectarse los rayos cósmicos en valores superiores a 3 MeV, aunque siempre se intenta minimizarlos a través de pantallas de plomo arriba, especialmente cuando se hace adquisición aérea.



(modificado de Edcon Gamma Surveys)

- **Lámpara Ultravioleta:** A partir de una idea de **H. Becquerel** (1859) y pasando por un prototipo de **W. Crookes** (1870), fue **Thomas Edison** quien la patentó en 1893 en Estados Unidos. Consta de un electrodo caliente, usualmente de tungsteno, que por emisión termoiónica desprende electrones a gran velocidad, que en su trayectoria alcanzan electrones corticales de átomos de mercurio presentes, desplazándolos de sus órbitas, como se ve a la izquierda. Cuando éstos regresan a su posición, emiten radiaciones ultravioleta que alcanzan los átomos del mineral fluorescente, los que por efecto Compton emiten ondas de frecuencias dentro del espectro visible para el ser humano.



(modific. de Cantos Figuerola, 1972)

UNIDADES DE CONTEO

En honor a **Wilhelm Röntgen** se usa el **miliroentgen** (10^{-3}R):

$\text{mR} = 7,5 \cdot 10^6$ golpes o cuentas/hora = $2,58 \cdot 10^{-7}$ C/kg en el aire

La “dosis equivalente” es el **sievert**: $1\text{Sv} = 1\text{J/kg} = 10^5\text{mR}$

en honor al sueco **Rolf Sievert**, pionero en estudios médicos de la radiación entre 1945 y 1965, inventor de aparatos de medida y muy activo en la ONU. Una exposición mayor a 0,25 Sv diarios es perjudicial para la salud (son 0,05 en una radiografía o un vuelo). No hay riesgo en sitios geológicos naturales.

RADIATIVIDAD DE LAS ROCAS (AQUENDE Y ALLENDE LA TIERRA)

Pese a su escaso espesor, la **corteza** se estima genera el 17% de la radiactividad terrestre total, porque es la envoltura con mayor proporción de radioisótopos (sobre todo en sus rocas graníticas). El **núcleo**, pese a su masa mucho mayor, sólo alcanzaría cerca del 18%. El restante 65% correspondería a la emisión del enorme **manto**.

La cuantía y distribución de las radiaciones es variable por estar en relación con la mayor o menor distribución de los elementos que las emiten, lo cual va a depender de la composición mineralógica de las rocas aflorantes (o, si fuera el caso, atravesadas por una calicata, una galería o un sondeo).

Sobre los cuerpos de agua la detección radiactiva se hace mínima, casi nula, y por esto se miden allí los valores de fondo (*background*) en cada región a prospectar.

Como se mencionó, los isótopos más abundantes, con períodos de semidesintegración del orden de la edad de la Tierra, son el $^{92}\text{U}^{238}$ ($4,5 \cdot 10^9$ años), el $^{90}\text{Th}^{232}$ ($1,4 \cdot 10^{10}$ años) y $^{19}\text{K}^{40}$ ($1,2 \cdot 10^9$ años). Los tres, pero sobre todo el **U** y el **Th** (frecuentemente como óxidos), **son generalmente más abundantes en las rocas ígneas y bastante más en graníticas que en basálticas**, variables en las metamórficas y más escasos en las sedimentarias (las arenas de monacita, con ThO_2 , son una de las excepciones). El $^{92}\text{U}^{238}$ constituye el 99,28% del total del U en la Tierra, el $^{90}\text{Th}^{232}$ es el 100% del torio y el $^{19}\text{K}^{40}$ representa sólo el 0,01% del total del potasio. En continentes la media es K 1,15%, Th 4,20ppm y U 1,09ppm. En corteza oceánica K 0,65%, Th 0,22ppm y U 0,07ppm.

Las **rocas calcáreas tienen niveles radiactivos normalmente muy bajos** (salvo en fracturas con depósitos de sales de uranio u otros casos excepcionales). En cambio se registra una radiactividad habitualmente **mayor entre las rocas clásticas debido al potasio**, que es normalmente más abundante en arcilitas (o en areniscas feldespáticas), así como por la presencia minoritaria de torio, **variando la relación Th/K según los distintos**

minerales de arcilla (se indica K_{total} , no sólo el $^{19}K^{40}$). En ambientes depositacionales reductores precipita el ión uranilo (UO_2^{++} , soluble en entornos oxidantes) y a la vez se preserva la materia orgánica, que luego podrá eventualmente mutar en hidrocarburos o carbón. De modo que **el uranio es indicador de roca madre o de combustibles fósiles**, que en el caso del petróleo puede luego migrar a reservorios de ambiente oxidante. (Ver cuadro de U y Th en sedimentos, rocas y fluidos).

Otros elementos radiactivos pueden registrar una importante participación en casos particulares.

Los demás planetas y sus lunas obvio que también tienen radioisótopos, aunque se conoce poco de Venus y otros. En la Luna, Marte y Mercurio se ha verificado la predominancia de K, U y Th en valores comparables a nuestra corteza oceánica. (Luna, K 0,10%, Th 0,23 ppm y U 0,06 ppm; Mercurio, 0,12%, 0,22 y 0,08 ppm; Marte, 0,38%, 0,59 y 0,16 ppm, respectivamente.)

La corteza granítica terrestre es única en todo el sistema Solar, resultado del agua y la tectónica de placas. La saturniana luna Titán quizá tenga mucho UO_2^{++} en su ambiente anóxico con lagos de hidrocarburos.

APLICACIONES PROSPECTIVAS

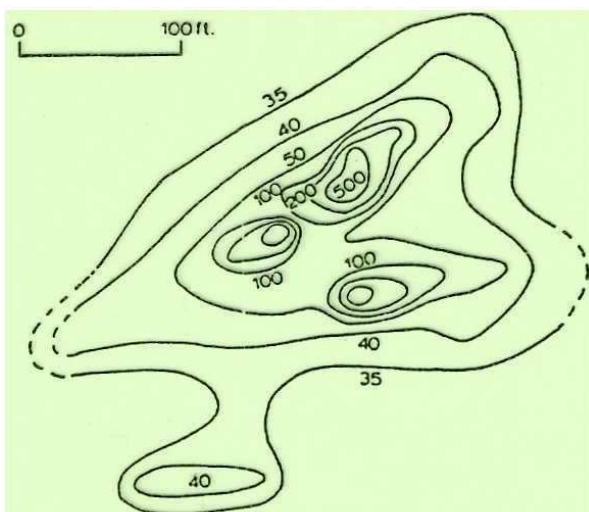
Las actividades de cateo por métodos radiactivos utilizando alguno de los aparatos detectores arriba referidos puede realizarse en la modalidad más antigua, terrestre, con un mallado acorde a las dimensiones del objetivo, ya sea éste regional o local. Pero también es posible hacerlo desde aviones, helicópteros, drones o mucho más raramente globos: es la **aerorradiometría**, que se inició durante la década de 1950, eficaz por la rapidez de cobertura de grandes áreas. **Arthur Brant** desde 1940 perfeccionó aplicaciones del contador Geiger-Müller para efectuar exploración aérea en el noroeste canadiense. Otros científicos siguieron su vuelo. Los recaudos en aerorradiometría son similares a los de otras metodologías aéreas (aerogravimetría, aeromagnetometría, aerelectromagnetismo y otras), es decir que habrán de procurarse altitudes de vuelo constantes y tan bajas como se pueda –desde aviones generalmente un mínimo de 100 metros, según el tipo de aeronave, relieves y regulaciones aéreas locales–, seguir líneas rectas paralelas, algunas otras perpendiculares para vinculación, y velocidades de vuelo lentas y constantes para un mejor muestreo –en aviones no es posible menos de 100 km/hora–. En el Tema 03 (pág.61) se ve un **ejemplo aéreo de radiometría en Canadá** junto a otros métodos.

La figura siguiente a la izquierda muestra un mapeo terrestre a escala de detalle también en Canadá. Y hacia la derecha datos de radiometría aérea de dos regiones que permiten ver la correlación de las ppm de equivalente U (de muestras) en relación al conteo radiométrico de campo.

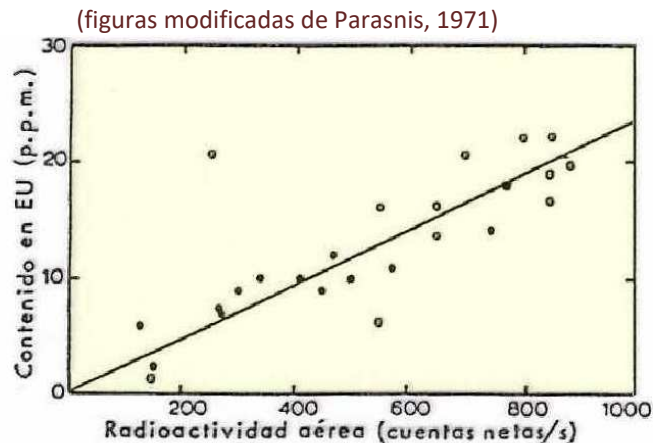
Contenidos medios de U y Th en rocas y sustancias naturales

SUSTANCIA	URANIO g/tm	TORIO g/tm
Agua del mar	0,00015 a 0,0016	
Fosfatos marinos	0,001 a 0,065	
Humus y cenizas de carbón	0,005	
Sedimentos marinos	0,65 a 1,07	
Cenizas vegetales	7	
Aguas de los campos petrolíferos	10	
Carbón kolm de las pizarras arcillo-aluminosas	50 a 100	
Petróleo	100	
Asfaltita de Utah (U.S.A.)	2880	
Rocas ígneas básicas	0,96	3,9
Rocas ígneas intermedias	2,61	9,97
Rocas graníticas	3 a 5	13,4
Diabasas	0,83	2
Basaltos	0,83	5
Calizas	1,3	1,1
Rocas sedimentarias en general	1,2	
Rocas de origen arenoso		5,4
Rocas de origen arcilloso		12
Arcillas pizarrosas		10,1

(modificado de Cantos Figuerola, 1972)



Mapa de radiactividad de una denuncia en la zona de Goldfields (Canadá); cuentas de destellómetro

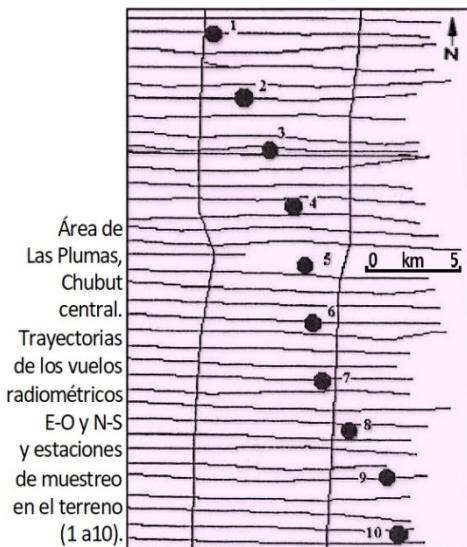


Equivalentes en uranio de muestras de suelo del condado de Washington y de la llanura costera de Tejas en función de la radioactividad aérea.
 ○ = Muestras del condado de Washington (eU calculada)
 ● = Muestras de la llanura Costera de Tejas (eU por análisis radiométrico).

DETECCION	DETECTADOS
1) Criaderos de minerales radiactivos	a) Uranio b) Torio c) Especies uranotoríferas
2) Criaderos de minerales asociados con radiactivos	a) Monacitas b) Tierras raras c) Tántalo-niobitas y sus paragenéticos (Sn, W, Ti) d) Berilio e) Vanadio (carnotita, tyuyamunita, francevillita) f) Potásicos (silvinita, carnalita, alunita) g) Feldespatos potásicos h) Muscovita i) Petróleos j) Ciertos carbones k) Ciertos asfaltos
3) Rocas con diversos grados de radiactividad	a) Areniscas b) Pizarras bituminosas c) Hipogénicas y volcánicas d) Sedimentarias e) Metamórficas f) Aluviones y placeres
4) Estructuras y dataciones geológicas	a) Fallas b) Diques pegmatíticos c) Límites formativos
5) Testificación geofísica	a) Minerales y rocas aflorantes b) Sondeos

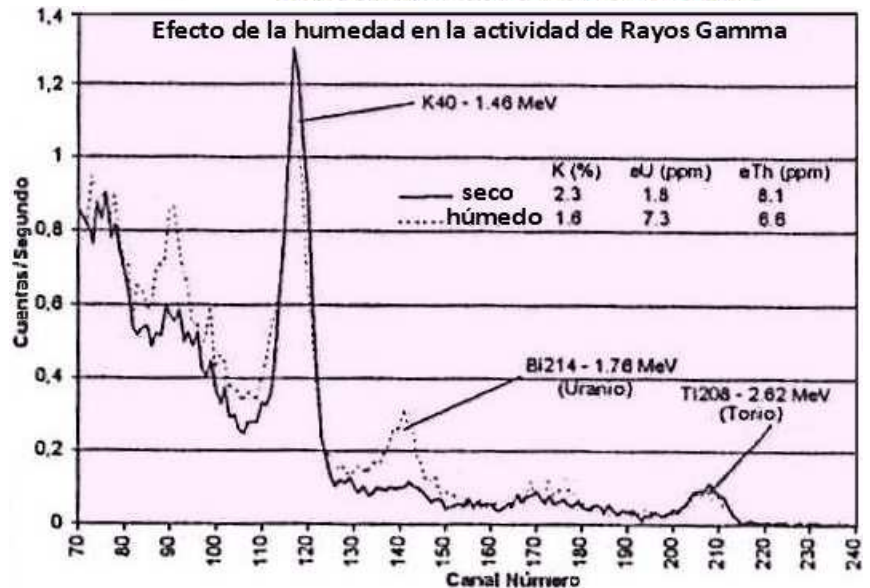
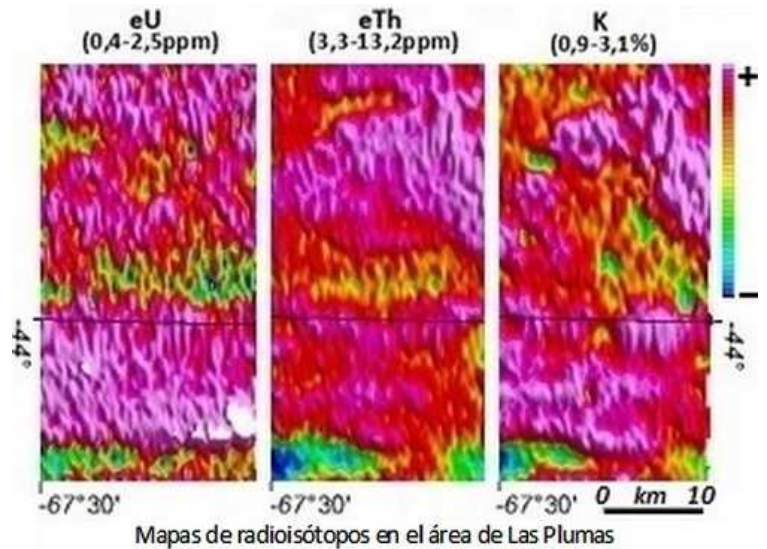
(modificado de Cantos Figuerola, 1971)

(figuras modif. de Ford & López, 1998)

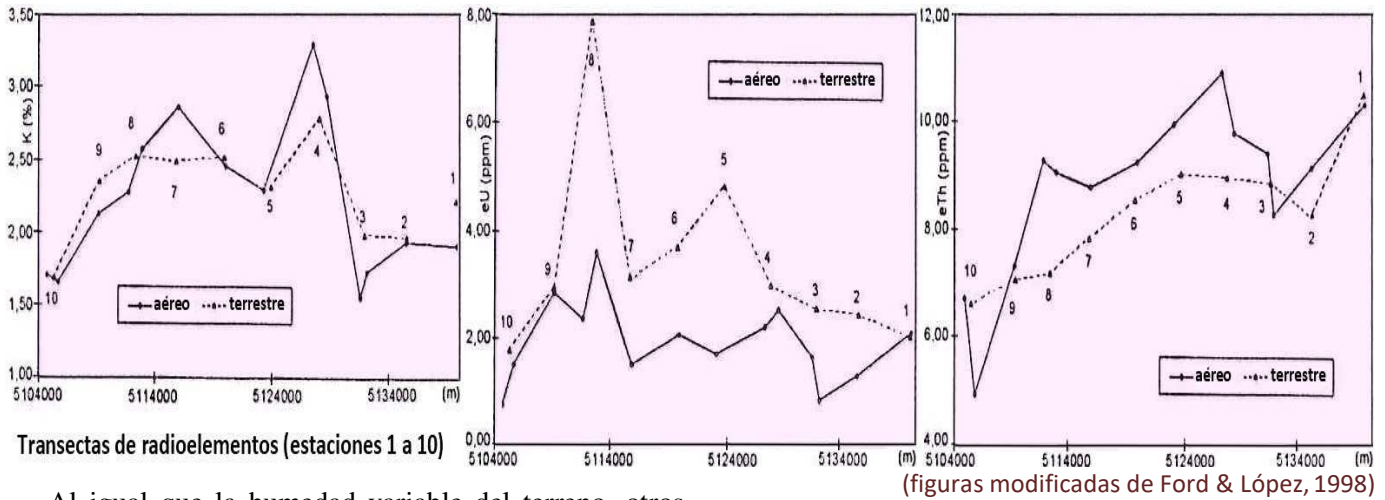


Los objetivos de este método, además de la intrínseca búsqueda de yacimientos de elementos radiactivos, pueden referirse a la *prospección de elementos no radiactivos de interés económico pero que se encuentren asociados paragenéticamente* con los que sí lo son (véase el cuadro adyacente), aunque en la determinación de los sectores de interés a partir del mapeo de valores debe evaluarse la posible dispersión de elementos radiactivos en un área mayor a la del yacimiento considerado.

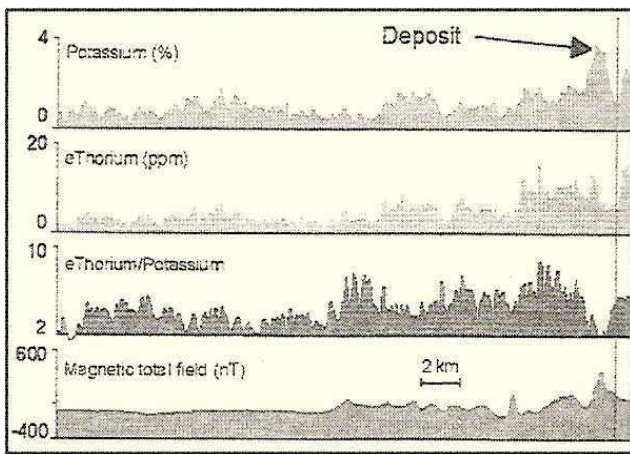
Las siguientes figuras ilustran una aplicación aérea en la que se coteja con datos espectrométricos terrestres y además se presenta una curva que manifiesta la detección variable de uranio (mediante Bi radiactivo) según que el suelo esté húmedo o seco, en función del clima estacional.



Esto se debe a que *el terreno húmedo impide el normal escape del radón hacia la atmósfera*. El radón, que hemos visto forma parte de la serie del ^{238}U , entonces se acumula dando una señal de ^{214}Bi que lleva a sobrevaluar el contenido en U. En la página siguiente la comparación de los perfiles aéreos y terrestres de los tres radioisótopos principales muestra una razonable concordancia general, pero en el caso del uranio hay un desplazamiento de toda la curva hacia valores más altos en los datos del muestreo terrestre hecho en estación húmeda, mientras que la adquisición de información aérea fue realizada en estación seca.



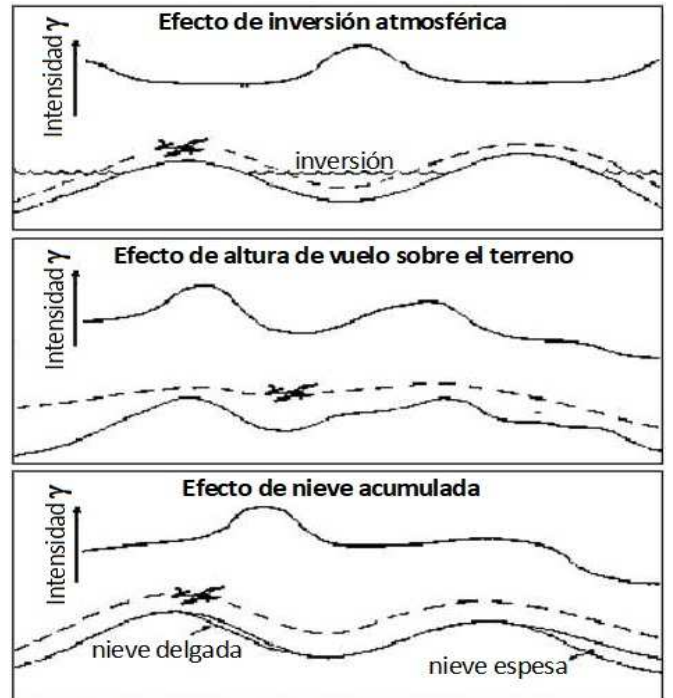
Al igual que la humedad variable del terreno, otros factores naturales pueden generar ruidos, como la inversión térmica atmosférica (*temperatura en altura mayor que a nivel del suelo*), la fluctuación marcada de la *altura de vuelo* respecto al nivel del terreno, *acumulaciones níveas delgadas que atrapan radón* (y hacen sobrevaluar el U), la *presencia de lagunas, ríos o nieve espesa* que hacen de pantalla (reduciendo la emisión γ) y la *contaminación humana*.



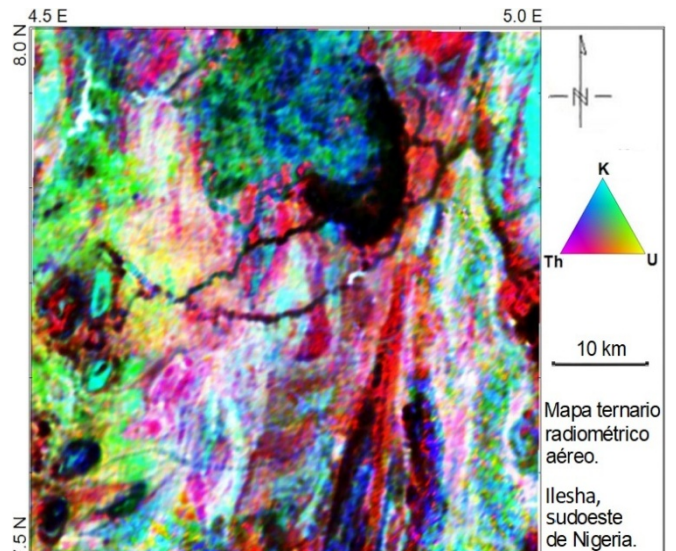
Perfiles radiométricos y magnético en el área Casino, centro-oeste del Yukón, Canadá (modificado de Ford *et al.*, 1998)

Sea en adquisición aérea como terrestre, *filtrar los ruidos es esencial como en todo método geofísico*, ello habilita un mejor procesamiento y luego una mucho más confiable interpretación de la información registrada. El procesado, además de todas las *correcciones o reducciones necesarias*, suele incluir *modelados (inversión de los datos)*, por ejemplo mediante deconvolución, así como a veces la *separación de componentes regionales y residuales*.

Es común representar cortes o mapas con relaciones Th/K para identificar distintos minerales arcillosos u otras litologías, como el caso de arriba en el yacimiento Casino, de Au, Cu y Mo porfírico, en Yukón (Canadá). Igualmente puede graficarse la relación U/Th y otras que pudiesen considerarse útiles.

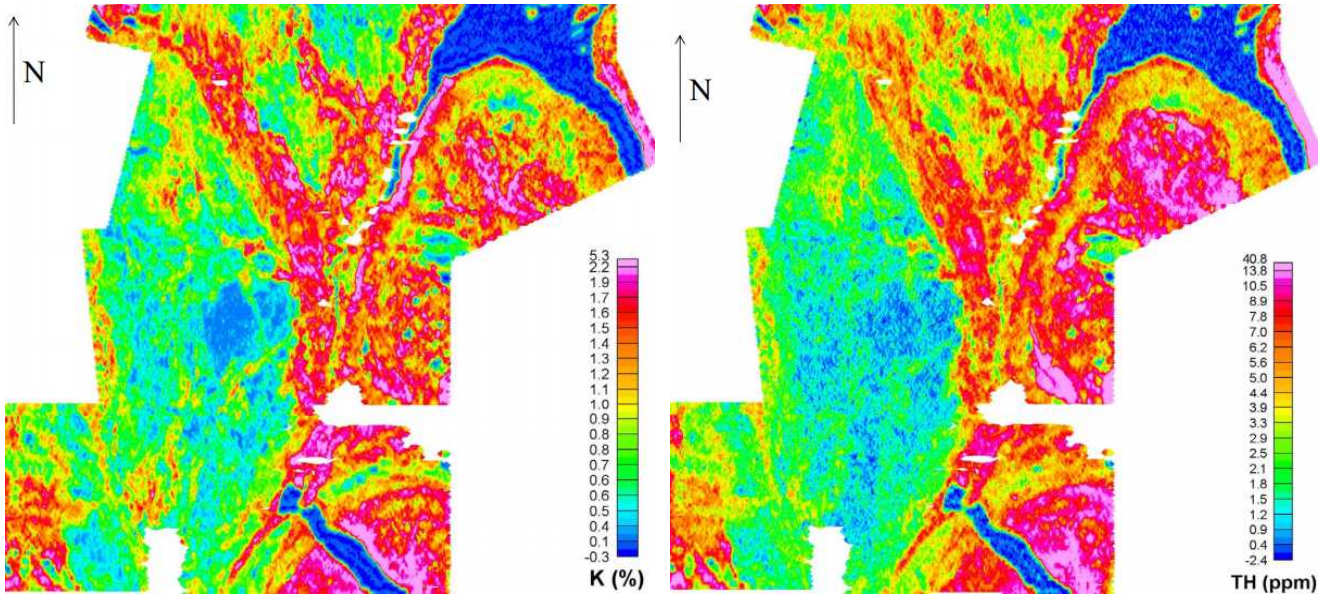


Ruidos en aeroradiometría (modificado de Hansen, 1980)



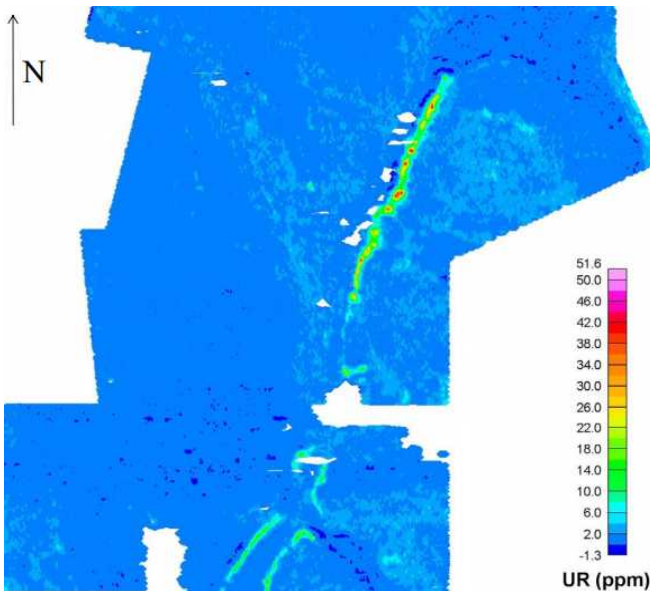
Mapeo aéreo (modificado de Okeyode *et al.*, 2019)

La figura al final de la página precedente es un **mapa ternario espectrométrico** aéreo en un área del sudoeste de Nigeria con rocas metamórficas de diverso tipo e intrusiones graníticas, donde los mayores valores de ppm (partes por millón) de eU y eTh corresponden a afloramientos de gneis y los mayores de % de K a los de granitos porfíricos. Es un tipo de presentación que asigna un color a cada serie isotópica registrada (en este caso torio en magenta, uranio en amarillo y potasio en celeste) cuya intensidad varía en función del conteo total de cada uno, que correspondería al 100% (color más intenso) hasta 0% (blanco) y sustrayendo los respectivos tres colores en cada punto de modo tal que si se acerca al negro es porque la radiactividad de las tres series es muy alta. En general se busca dar cierta semejanza entre el color real de las rocas y el resultante de estos mapas, aunque en otros relevamientos se ha optado por otras paletas de color para los mapas ternarios.



Noruega, mapas aéreos de K, Th y U (de Baranwal *et al.*, 2010)

Estos tres mapas espectrométricos corresponden a una zona de afloramientos de muy variadas rocas ígneas en Noruega (desde granitos hasta basaltos) en la que existen mineralizaciones de cobre, plata, níquel, niobio, molibdeno, etc. El uranio fue mapeado a partir de la detección de radón, por lo cual se lo designa como UR, e indica una línea de fractura tectónica muy definida y otras menores.



UAV (unmanned aerial vehicle) Geoscan 401 llevando un espectrómetro de rayos γ (foto geoscan.ru)

Detección en fondo de cuerpos de agua

Las radiaciones prácticamente no atraviesan el agua pero pueden ser detectadas en el fondo. La primera vez que fue hecho, en 1964, se empleó un contador Geiger-Müller y el objetivo fue evaluar la radiación en torno a un submarino atómico de los Estados Unidos que se había hundido un año antes frente a las costas de Massachusetts, durante pruebas de inmersión profunda, causando la muerte de sus 129 tripulantes.

La tecnología evolucionó y actualmente se emplean espectrómetros a control remoto adaptados para fondos de lagos o mar (ver foto). No es un tipo de prospección muy habitual, pero se recurre a ésta cuando hay interés en estudiar aspectos geológicos y

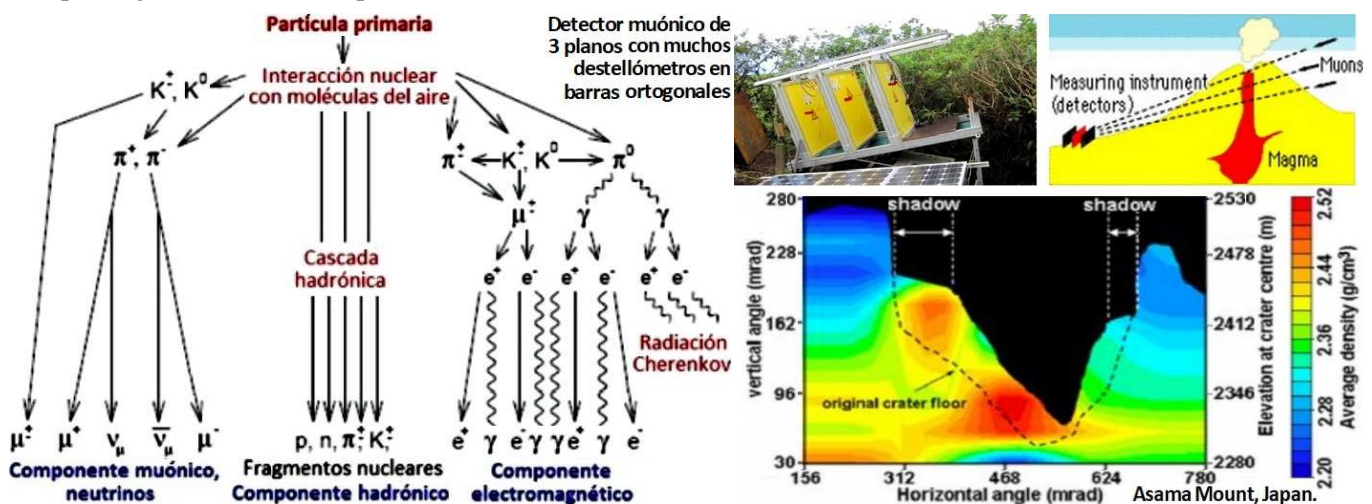


Espectrómetro HPGe de fondo marino (foto Baltic Sc. Instr.)

ambientales, por ejemplo emanaciones relacionadas con zonas de falla, manaderos calientes, escapes de fluidos hidrotermales y otros condicionantes de la biología marina o indicadores de la tectónica o la geología subácea en general. También obviamente para monitoreos en áreas cercanas a plantas de energía nuclear, repositorios de materiales radiactivos, descargas ilegales o, como mencionamos, naufragios conteniendo radioisótopos.

Tomografía muónica

Es una técnica que permite mapear túneles, cámaras y fracturas naturales o artificiales. La primera experiencia fue iniciada con un dispositivo detector insuficiente en la pirámide de Keops en 1967 y tuvo que interrumpirse a causa de la guerra contra Israel. La dirigió el físico estadounidense **Luis Álvarez**, que antes había ido en un avión por detrás del que lanzó la atómica de Hiroshima, para estudiar sus efectos, fue premio Nobel y padre de Walter, el geólogo que planteó el impacto de un asteroide hace 66 m.a. Pero recién en este milenio se ha dispuesto de detectores eficaces y capacidad de procesamiento suficiente. Los muones son como electrones con sobrepeso: $105.66 \text{ MeV}/c^2$ versus $0.511 \text{ MeV}/c^2$ respectivamente. Se generan en la alta atmósfera por el bombardeo de rayos cósmicos que reciben las moléculas de oxígeno, nitrógeno, etc. Los muones son parcialmente absorbidos por roca y otros materiales sólidos (a mayor densidad mayor absorción). El registro de los muones que han atravesado un volumen de interés permite calcular sus variaciones de densidad y las eventuales cavidades. Los detectores pueden hacerse con específicos diseños de centellómetros, cámaras de ionización, detectores de Cherenkov o un particular cámara de niebla o de (**Charles**) **Wilson** (físico escocés que la inventó en 1911 y fue Nobel) con capas alternas de emulsion, plástico y metal. Registrando desde muchas ubicaciones es posible hacer un procesamiento que permite conocer la configuración tridimensional de estructuras volcánicas, ruinas arqueológicas, etc., incluso posibles fisuras en la central de Fukushima tras el tsunami de 2011.



Cascada de partículas por interacción de rayos cósmicos con los gases de la alta atmósfera (modific. de tandem.nipne.ro), detector (foto Larry Schultz) y sección con densidades computadas en un volcán japonés (modific. de Tanaka *et al.*, 2007)

RADIOMETRÍA Y GEOQUÍMICA

En relación a los hidrocarburos, en primer lugar sabemos que el K está presente en arcillas, feldespatos, etc. y es entonces un indicador litológico importante. También lo es el Th, ya que permite la identificación de tipos de arcillas, tal como se hace en los perfiles radiactivos de pozos. Pero además el U, como se explicó, está asociado al petróleo y a su roca madre. Siempre que hay hidrocarburos ocurre aumento de radiactividad debida al uranio, la cual suele magnificarse en zonas de falla o áreas de **microfugas de hidrocarburos** hacia la superficie. El mapeo de este tipo de anomalías (por **micromanaderos**) suele ser una interesante herramienta prospectiva, como fue empleada en Mozambique junto con magnetometría y EM (Pfaffhuber *et al.*, 2009).

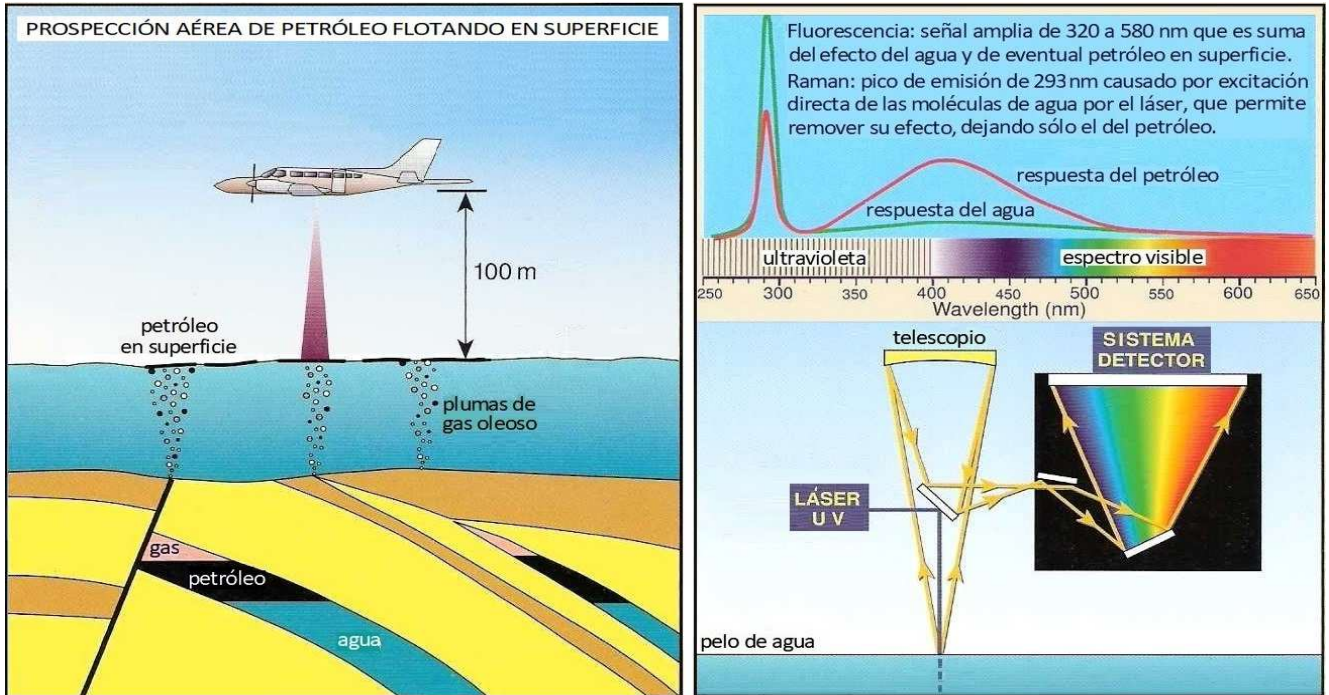
Y a menudo la radiometría es un complemento de las **metodologías geoquímicas**:

- muestreo microbiológico en general para cuantificar sus variaciones
- determinación específica de bacterias de la biodegradación
- detección de gases: helio producido por el decaimiento radiactivo del uranio y otros elementos, radón, que como vimos es un isótopo de la serie del uranio, cromatografía de metano, etano, propano y butano escapados de reservorios
- evaluación de las alteraciones del suelo (caolinita, carbonatos, yoduros, piritita, magnetita, etc.)
- estimación de cambios geobotánicos, y otros, **también con la ayuda de imágenes aéreas o satelitales en distintos rangos del espectro EM, visible, UV, de radar, etc.**

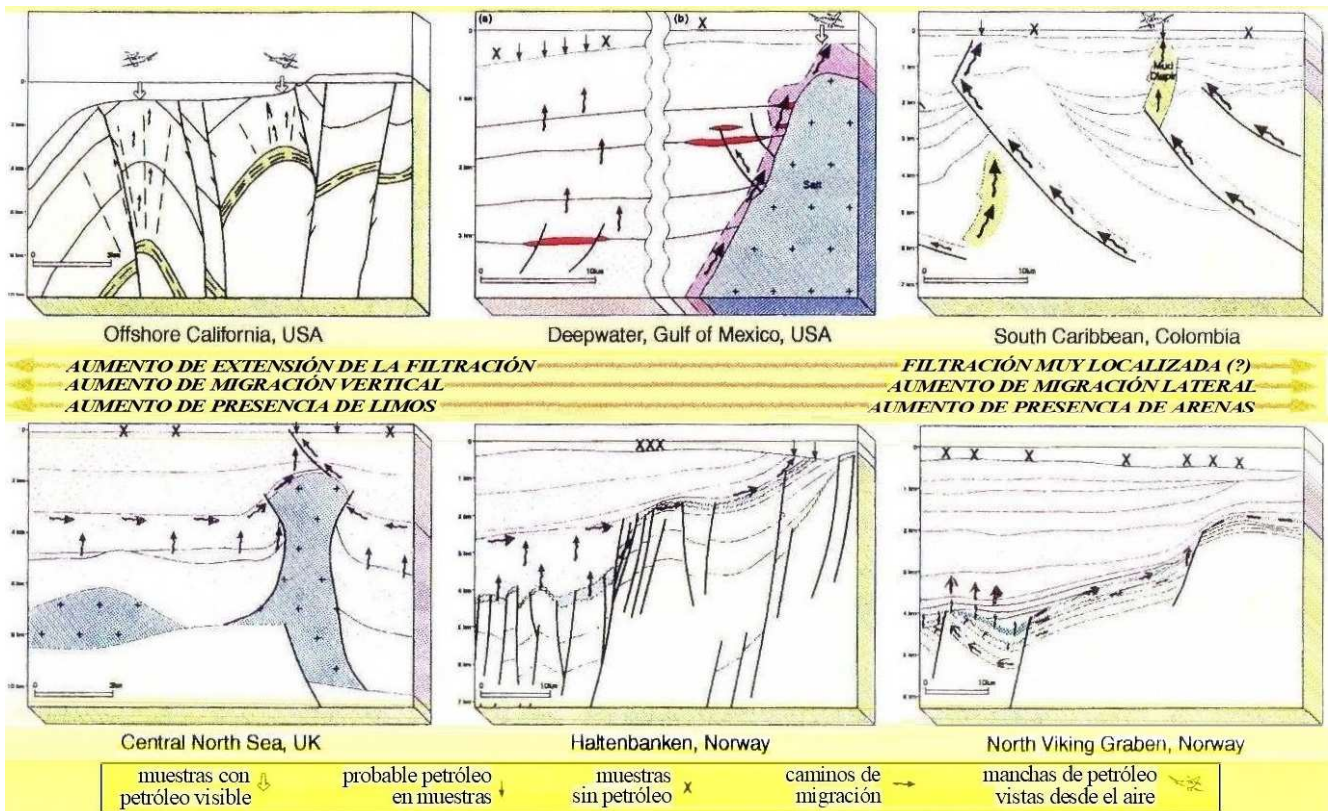
Ya hemos visto que distintos métodos permiten detectar en forma indirecta algunas de estas alteraciones: micromagnetetría, inyección de corriente, electromagnetismo, polarización inducida.

Otros registros, como la **detección de gases**, que se puede hacer indirectamente con la prospección radiométrica, en forma aérea o terrestre, por ejemplo con un emanómetro.

(modificado de World Geoscience Corporation)



Las figuras acá arriba refieren a una técnica moderna que permite *detectar manchas de petróleo desde el aire*, tanto en tierra como sobre cuerpos de agua, un caso especial donde la radiometría funciona sobre lagos o mares. Se basa en la espectroscopía Raman descubierta por el indio **Chandrasekhara Raman** (nacido en Tamil Nadu,

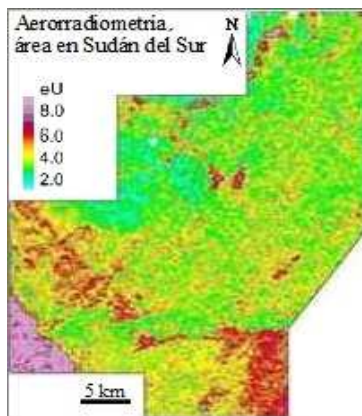


Relación entre filtración de hidrocarburos en superficie y reservorios profundos (modificado de Thrasher et al., 1996)

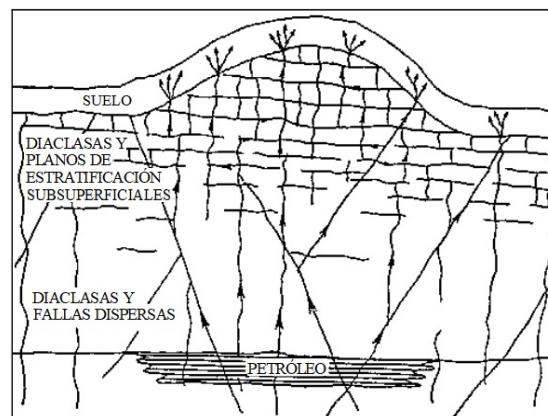
investigador en las universidades de Calcuta y Bangalore) que por ello recibió el premio Nobel en 1930. Su fundamento es el análisis de la difusión de la radiación electromagnética de una sustancia que ha sido impactada por un láser que emite en una frecuencia específica (monocromática). El método para el objetivo petrolero requiere la **eliminación de ruidos culturales** (contaminación), así como los causados por la posible presencia de algas fluorescentes y otros. Lo que intenta detectarse es la respuesta de hidrocarburos fugados desde reservorios profundos bajo el lecho y llevados en forma de burbujas hasta la superficie ática. Si las corrientes son fuertes estas burbujas oleosas también podrían aparecer muy desplazadas de la zona submarina de la cual proceden. Debajo de la página anterior se esquematizan algunas posibles vías de microfuga y **filtración ascendente de gas y petróleo** en distintos contextos cuencales.

Los manaderos pueden generarse en forma directamente vertical o más compleja, a través de las propias rocas reservorio, cuando éstas inclinan, por zonas de falla o bordes de cuerpos emplazados que resultan permeables, o simplemente atravesando las rocas sello, que muy frecuentemente no son perfectamente sellantes. Téngase presente que **los domos salinos dan respuesta radiactiva casi nula**.

Abajo, un plano resultante de una prospección aerospectrométrica sobre rocas con hidrocarburos escapados de los reservorios, en Sudán del Sur: país escindido de Sudán desde 2005 por antiguas razones étnicas que fueron muy agravadas por la injerencia occidental motivada por sus reservas petrolíferas y las previsible ganancias



(modificado de GammaSense)



(modificado de Saunders, 1995)

para multinacionales que están dejando un preocupante pasivo ambiental y exiguo beneficio para esa pobrísima nación.

La detección del $^{83}\text{Bi}^{214}$ (eU, ventana de 1,66 a 1,86 MeV) es indicación de la presencia de uranio, derivado en este caso del ambiente anóxico donde fue precipitado el ion uranilo: la cocina del petróleo. Un caso similar en Siria fue publicado por Asfahani, 2021. El modelo, como se adelantó en

el Tema 08 (pág.200), asume que hidrocarburos ligeros pueden fugarse de sus trampas a través de eventuales fisuras y las bacterias lo esperan más arriba para consumirlo y así biodegradarlo, dando como resultado diversos efectos subsuperficiales detectables con variadas técnicas. El proceso de degradación crea dióxido de carbono que forma a su vez ácido carbónico que queda retenido en los acuíferos. Esto puede lixiviar el potasio de los suelos dando en consecuencia una relativamente baja señal en el registro espectrométrico. El ácido carbónico también puede reaccionar con silicatos de calcio para crear una mineralización de carbonato de calcio secundario, la cual en algunas ocasiones causa alteraciones de tonalidad geomorfológica y anomalías en los flujos de drenaje, así como anomalías de velocidad de las ondas sísmicas.

La degradación de los hidrocarburos debida a la acción de las bacterias anaerobias también genera sulfuro de hidrógeno como subproducto, causando un ambiente químicamente reductor, que a su vez concentra uranio por encima del reservorio petrolífero. Entonces, una baja señal de potasio y una alta de uranio son indicadores favorables para la prospección de yacimientos de hidrocarburos profundos. El ambiente químicamente reductor también puede promover la conversión de minerales de hierro no magnéticos en otros que sí lo son, originando como consecuencia una señal magnéticamente detectable desde la superficie, incluso suelos con magnetita. Y todo este combo puede además alterar en general la composición edafológica, influir en el contenido de humedad del suelo y finalmente también alterar su biota, siendo numerosas veces perceptible el cambio en la vegetación que denuncia la presencia de trampas en el subsuelo.

UTILIZACION DE LOS ISÓTOPOS RADIATIVOS

Aunque es un ítem fuera de nuestra asignatura, mencionaremos brevemente la existencia de numerosas aplicaciones, muchas de las cuales se realizan con isótopos sintetizados artificialmente (sobre todo de los que están al final de la tabla periódica). Reactores de investigación y producción de radioisótopos han sido exportados desde Argentina por la asociación CNEA-INVAP (desfinanciada en el período 2016-2019 y nuevamente desde 2024 como parte de la política de subordinación al poder financiero occidental).

Entre los beneficios debe citarse todo lo relacionado con la medicina: radioterapia, radiografías nucleares, etc.,

incluyendo las imágenes *PET* (*Positron Emission Tomography*). Asimismo con la esterilización de materiales desechables (de origen quirúrgico, biológico diverso o químico), la desinsectación con rayos γ , la radio-desinfectación y la preservación de alimentos. También **los trazadores** en procesos físicos, químicos, biológicos o médicos. La centellografía se usa para el diagnóstico y seguimiento de una afección: se ingiere o inyecta una cantidad mínima de radioisótopo que se desplaza por el torrente sanguíneo hasta los diferentes órganos, lo cual es detectado por su emisión γ para así crear imágenes sobre alteraciones óseas, tiroideas, mamarias, etc.

Análogamente en la explotación petrolera, marcando algunas sustancias para estudiar sus desplazamientos y **monitorear el movimiento de fluidos entre pozos inyectores y productores** en un proyecto de recuperación secundaria o terciaria. También hay aplicaciones industriales variadas (control de espesor de hojas y láminas de distintos materiales, control de llenado de envases de productos diversos, imágenes de dispositivos y otras). Y se realizan análisis por activación radiactiva (como la utilizada en los fósforos de los centellómetros), es decir, irradiar un elemento con neutrones u otro tipo de radiación que consigue activarlo (transformarlo parcialmente en un isótopo radiactivo) permitiendo luego con un detector llegar a calcular su concentración con una precisión de hasta centésimas de partes por millón.

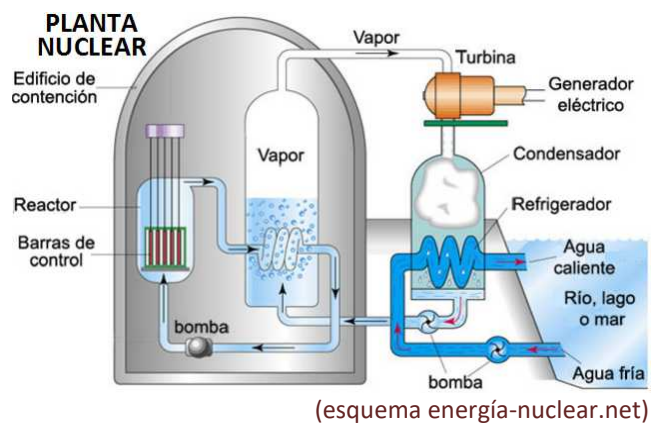
La producción de energía puede hacerse mediante los generadores termoelectrónicos de radioisótopos. Igualmente con pilas atómicas (como la pionera de **Enrico Fermi** en 1942 en la universidad de Chicago, de 4 metros de altura) y con reactores de fisión de baja o alta potencia –cuyo calor vaporiza el agua que luego hace andar turbinas–. Las grandes centrales nucleoelectrificadas lo hacen con uranio natural (cada vez menos) o bien enriquecido en el isótopo ^{235}U , el único fisible por absorción de neutrones lentos o termales –en Argentina en 2015 se comenzó a realizar enriquecimiento en Pilcaniyeu, Río Negro, mediante difusión gaseosa–, en tanto que el ^{238}U es muy difícilmente fisible.

Las centrales o usinas requieren de barras de grafito para controlar la reacción de fisión absorbiendo neutrones mediante su introducción en huecos entre las vainas del combustible del reactor, y eventualmente para detener la reacción en cadena. También hace falta agua pesada (11% más densa que la normal por contener deuterio) para moderar la reacción al reducir la velocidad de los neutrones sin absorberlos si la fuente es uranio sin enriquecer, pero puede usarse agua común cuando el uranio ha sido previamente enriquecido. En Arroyito (Neuquén) existe la mayor productora mundial de agua pesada.

Las centrales por fusión a partir de deuterio (1H^2) o tritio (1H^3) todavía no son completamente viables, aunque está en progresivo desarrollo en Cadarache (sudeste de Francia) el proyecto *ITER* (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) a partir del *tokamak* (acrónimo de *тороидальная камера с магнитными катушками*, *toroidal'naya kamera s magnitnymi katushkami*), una cámara toroidal con bobinas magnéticas que confinan la

reacción, cuyo prototipo fue diseñado en 1956 en la Unión Soviética por los rusos **Andrej Sacharov** e **Igor' Tamm**, hacedores de otros valiosos aportes y luego ambos premio Nobel, aunque Sacharov de la paz y Tamm de física. Existen variantes del *tokamak* en China, India, Brasil y varios otros países.

En Livermore, California, un modelo alternativo, más compacto, realiza un confinamiento inercial recurriendo a 192 potentes láser que comprimen el plasma de hidrógeno, deuterio y tritio para poder iniciar el proceso de fusión a temperaturas más bajas que en el *ITER* y representa el primer resultado que genera más energía que la necesaria



Tokamak del proyecto de fusión ITER (imagen Paolo Verzone)

para desencadenar la reacción nuclear controlada.

Y otra opción se está experimentando en Foothill Ranch, también California, mediante la fusión a partir de hidrógeno y boro, que prescinde de los neutrones y evita entonces la escoria radiactiva que deriva de éstos, dejando sólo tres núcleos de helio como subproducto de cada reacción Bo-H, que es la razón por la que se lo ha denominado TAE (*Tri Alpha Energy*). Y los progresos continuarán seguramente hasta llegar a conseguir una generación energética segura, eficiente y ambientalmente sustentable.

De la emisión radiactiva terrestre total sólo el 1% es obra nuestra, pero está concentrada en puntos críticos.

En el norte de Ucrania, a 16 km de la frontera con Bielorrusia, a las 01:24 a.m. del 26 de abril de 1986 ocurrió el desastre del reactor nuclear 4 de la central Vladímir Lenin (a 18 km de Chernóbil y 3 km de Prípiat, el pueblo de los trabajadores, hoy fantasmal) que evidentemente no reunía todos los recaudos de seguridad. Ocurrió por groseros errores de prueba y sólo fue informado dos días después por el criminal régimen soviético, cuando los suecos ya habían detectado la radiación a 2.000 km llevada por los vientos del sudeste. Fallecieron al menos 31 operarios (2 como consecuencia de la explosión, 29 liquidadores en días, 19 en años sucesivos), 15 niños (por cáncer de tiroides) y la Organización Mundial de la Salud estima que en total unas 4.000 personas han muerto por distintos tipos de cáncer y malformaciones genéticas debidas a la radiación. Las organizaciones ambientalistas estiman cifras mucho más altas de fallecimientos, aunque sin datos comprobables. Igualmente han quedado muchos miles de personas con problemas de salud moderados o graves, además del daño y muerte en la flora y fauna. Se ha construido un nuevo sarcófago sobre el anterior, que se estaba deteriorando, porque el monstruo radiactivo no ha muerto.

Otro grave accidente nuclear había acaecido también en la Unión Soviética en 1957 en la central de Mayak cerca de Cheliábinsk (al este de los montes Urales) por la explosión de un tanque de desechos radiactivos. Unas 10.000 personas fueron evacuadas y al menos 200 fallecieron. Se pudo mantener en secreto por casi veinte años. Como comparación, en eventos no bélicos, el mayor derrumbe de una represa, entre muchos otros, ocurrió en Henan, China, en 1975 y produjo 26.000 muertes inmediatas y otras 145.000 por las epidemias y hambruna subsiguientes. Así como la peor tragedia minera ocurrió en una explotación de carbón en Benxi, Manchuria, en 1942 por una potentísima explosión de gas grisú (durante la ocupación japonesa de China), causando 1.549 fallecidos. Y en 1984 en Bhopal, India central, el escape de gas tóxico (uno entre muchísimos más en todo el mundo) de una fábrica de pesticidas de la estadounidense Union Carbide causó unas 20.000 muertes, además de los sobrevivientes muy afectados y el desastre ambiental.

Otros accidentes nucleares en centrales y radioterapia han provocado relativamente pocas o ninguna víctima fatal. En Argentina un técnico falleció en instalaciones de la CNEA en 1983 a causa de una falla humana y de protocolo durante la operación de un reactor de investigación. Un incidente de muchísima mayor magnitud aconteció en 1979 en la central de Three Mile Island (Pennsylvania, Estados Unidos), afortunadamente sin víctimas fatales tras una vasta evacuación del área circundante. En Fukujima, Japón, durante el tsunami de 2011, reactores situados sobre la costa fueron afectados por fallos en la construcción (corrupción de la empresa Tepco, mal controlada por el gobierno) y la principal imprevisión de haber hecho un muro de sólo 6 m de altura cuando en la zona había antecedentes de tsunamis ¡de más de 40 m! Hubo 21 operarios afectados por la radiación, uno muerto, y se estableció un radio de evacuación de 30 km que causó la muerte estimada de más de 500 personas por ansiedad y angustia, en general ancianos. Además en una especie de mariposas se hallaron mutantes sin problemas significativos.

Estadísticas serias muestran que la energía atómica ha causado un índice de muertes humanas parecido al producido por el uso de la energía eólica, así como de la generación solar, unas 40 veces menor que la hidroeléctrica, 90 veces menor que la del gas, 150 veces menor que la quema de biomasa, 600 veces menor que la generación en base a petróleo y 850 veces menor que la del carbón. Para el caso de las últimas cuatro se han sumado los muertos por contaminación atmosférica y los guarismos son muy conservadores.

Pero, desde luego, el mayor riesgo de la energía nuclear es el de las bombas atómicas. Las más antiguas de fisión, las posteriores de fusión (que en verdad son detonadas por fisión, que representa cerca del 50% de la energía total) y las más recientes llamadas neutrónicas (en las que el porcentaje de fisión se ha reducido a casi el 5%, haciéndola de menor rendimiento destructivo pero con 7 veces mayor proporción de radiación ionizante por neutrones rápidos, lo cual es letal para todo yuyo o bicho, cualquiera sea su número de ramas o patas). Y lo peor es que tan inconmensurable potencial bélico está en manos de una especie cuyos líderes y seguidores no pocas veces han perdido toda racionalidad y compasión.

Sí ya es doloroso el sufrimiento del mundo natural donde los seres enferman, se agreden, se mutilan, agonizan, se devoran... Encima nosotros. ¿Todo en 6 días? Se dice que el Barba hizo un trabajo demasiado apurado...

CUESTIONARIO BÁSICO

- ¿Qué son el período de semidesintegración y la vida media?
- ¿En qué consiste esencialmente la geocronología a partir de la radiactividad?
- ¿Qué tipos de radiaciones pueden medirse en prospección como señal o como ruido y qué efectos pueden producir?
- Describir los tres tipos de efectos de las radiaciones.
- Citar los tres elementos radiactivos más usados en prospección y los isótopos de sus respectivas series que son medidos en la práctica.
- ¿Qué aparatos detectores son utilizados en exploración?
- ¿En qué tipos de rocas podemos medir valores altos de los distintos elementos radiactivos?
- Comentar las aplicaciones petroleras del método.
- ¿Qué ruidos pueden aparecer en la aplicación de las diversas variantes prospectivas?
- ¿Cómo se complementa la radiometría con la geoquímica?

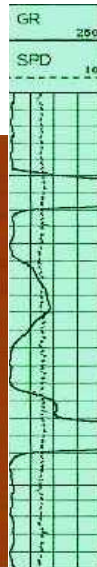
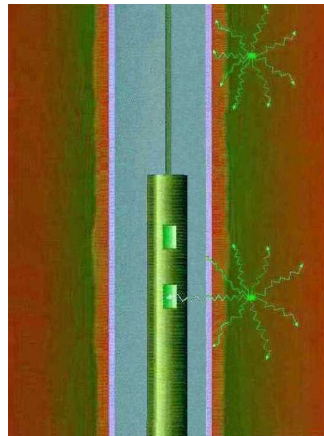
BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- Anderson, D., 1992. The Earth's interior. En *Understanding the Earth* (p 45-66); Brown, G., Hawkesworth, C. & Wilson, C. Eds. Cambridge University Press.
- Arévalo Jr., R., McDonough, W. & Luong, M., 2009. The K/U ratio of the silicate Earth: Insights into mantle composition, structure and thermal evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, N°278 (p 361-369). Elsevier.
- Asfahani, J., 2021. Airborne gamma-ray spectrometric technique for exploring potential hydrocarbon accumulations in Ar-Rassafeh Badyieh Area-2, Syria. *CIM Journal*, V.12 N°3 (p 105–115).
- Baranwal, V., Watson, R., Smethust, M. & Rønning, J., 2010. Geological mapping using airborne gamma ray spectrometry. *Norges Geologiske Undersøkelse*, presentation (22 p).
- Cantos Figuerola, J., 1972. *Tratado de geofísica aplicada* (p 447-474, 495-510). Librería de Ciencia e Industria.
- Coppens, R., 1963. *La radiactividad de las rocas* (56 p). EUdeBA.
- De Paoli, L., 2011. *L'energia nucleare; costi e benefici di una tecnologia controversa* (142 p). Edizioni Il Mulino.
- Ford, K. & López, L., 1998. Characterization of leveling problems of Patagonia gamma-ray spectrometry survey, Chubut province, Argentina. En *Geofísica aérea y geoquímica en la prospección geológico-minera*; Anales 31 (p 117-121). IGRM-SEGEMAR.
- Ford, K., Shives, R. & Charbonneau, B., 1998. Application of airborne gamma-ray spectrometry to geological mapping, mineral exploration and land-use planning. En *Geofísica aérea y geoquímica en la prospección geológico-minera*; Anales 31 (p 131-150). IGRM-SEGEMAR.
- Forte, S. & Rottoli, L., 2019. *Fisica quantistica* (368 p). Zanichelli Editore.
- Fowler, C., 1990. *The solid Earth* (p 191-217). Cambridge University Press.
- Griffiths D. & King, R., 1972. *Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos* (p 210-212). Editorial Paraninfo.
- Hansen, D., 1980. *Radiometrics; Cap.1. En Practical Geophysics for the Exploration Geologist* (1038 p). Van Blairicom, R. Ed. Northwest Mining Association.
- Hawkesworth, C., 1992. Geological time. En *Understanding the Earth* (p 133-144); Brown, G., Hawkesworth, C. & Wilson, C. Eds. Cambridge University Press.
- Hernández-Bernal, M., Tolson, G. & Solís-Pichardo, G., 2000. Geoquímica de elementos traza y su relación con la petrogénesis de rocas ígneas: modelado de sistemas isotópicos. *GEOS* (p107-118) Unión Geof. Mexicana A.C.
- Kumagai, H., Iwase, R., Kinoshita, M., Machiyama, H., Hattori, M. & Okano, M., 2012. Environmental gamma-ray observation in deep sea. En *Tech, Gamma Radiation* (p 55-74); Adrovic, F. Ed.
- Howell, B., 1962. *Introducción a la geofísica* (p 42-60). Ediciones Omega.
- Logan, G., Jones, A., Ryan, G., Wettle, M., Thankappan, M., Grosjean, E., Rollet, N. & Kennard, J., 2008. Review of Australian offshore natural hydrocarbon seepage studies. *Geoscience Australia*, N°17 (246 p).

- Lechmann, A., Mair, D., Ariga, A., Ariga, T., Ereditato, A., Nishiyama, R., Pistillo, C., Scampoli, P., Schlunegger, F. & Vladymyrov, M., 2021. Muon tomography in geoscientific research - A guide to best practice. *Earth-Science Reviews*, V.222 (29 p).
- Lowrie, W., 1997. *Fundamentals of geophysics* (p 169-177). Cambridge University Press.
- Lunine, J., 1999. *Evolution of a habitable world* (p 47-53). Cambridge University Press.
- Okeyode I., Olurin O., Ganiyu S. & Olowofela J., 2019. High resolution airborne radiometric and magnetic studies of Ilesha and its environs, southwestern Nigeria. *RMZ-Materials & Geoenvironment* V.66 (p 051–074).
- Parasnis, D., 1971. *Geofísica minera* (p 296-303). Editorial Paraninfo.
- Pfaffhuber, A., Monstad, S. & Rudd, J., 2009. Airborne electromagnetic hydrocarbon mapping in Mozambique. *Exploration Geophysics*, N°40 (p1-9). A.S.E.G.
- Ross Taylor, S., 1992. The origin of the Earth. En *Understanding the Earth* (p 25-43); Brown, G., Hawkesworth, C. & Wilson, C. Eds. Cambridge University Press.
- Saunders, D., 1995. Overview of radiometrics and related surface methods for petroleum exploration. *Association of Petroleum Geochemical Explorationists Special Publication* N°3 (24 p).
- Schumacher, D., 1996. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments. En *Hydrocarbon migration and its near-surface expression* (p 71-90). Schumacher, D. & Abrams, M. Eds, American Association of Petroleum Geologists, *Memoir* 66.
- Sharma, P., 1976. *Geophysical methods in geology* (p 295-318). Elsevier Scientific Publishing Co.
- Sheriff, R., 1991. *Encyclopedic dictionary of exploration geophysics* (376 p). Society of Exploration Geophysicists.
- Tanaka, H., Nakano, T., Takahashi, S., Yoshida, J., Takeo, M., Oikawa, J., Ohminato, T., Aoki, Y., Koyama, E., Tsuji, H. & Niwa, K., 2007. High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, V.263, N°1-2 (p 104-113).
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. & Keys, D., 1976. *Applied geophysics* (p 736-770). Cambridge University Press.
- Thrasher, J., Fleet, A., Hay, S., Hovland, M. & Düppenbecker, S., 1996. Understanding geology as the key to using seepage in exploration: spectrum of seepage styles. En *Hydrocarbon migration and its near-surface expression* (p. 223-241). Schumacher, D. & Abrams, M. Eds. American Association of Petroleum Geologists, *Memoir* 66.
- Tyler, A., 2008. *In situ* and airborne gamma-ray spectrometry. *Radioactivity in the Environment*, V.11 (p 407-448).
- Udías, A. & Mezcua, J., 1997. *Fundamentos de geofísica* (p 401-415). Alianza Editorial.
- Walker, M., 2005. *Quaternary dating methods* (304 p). John Wiley and Sons.
- Williams, A., 1996. Detecting leaking oilfields with ALF, the Airborne Laser Fluorosensor: case histories and latest developments. *Geological Society of Malaysia Bulletin*, V.39 (p 123-129).

Los posibles errores y sesgos contenidos en estas Glosas de Geofísica son sólo atribuibles al primero de los autores.

RADIOMETRÍA DE POZO



Herramienta, perfil y fuentes en pozo.

**“Истина открывается тиши
тем, кто её разыскивает.”**

[“La verdad se revela en el silencio de quienes están en su búsqueda.”]

Dmitri Ivánovich Mendeléyev (circa 1870)

El 1587 **Galileo Galilei** tenía veintitrés años y su genio comenzaba a brillar en Pisa. Ese año fue fundada Tobolsk, sobre las ruinas (y cadáveres) de la recién destruida capital del kanato tártaro de Kashlik (heredera del vastísimo imperio horrorosamente conquistado tres siglos antes por el mongol Gengis Kan con sus hordas: de *ordü*, gran acampe). Era el inicio del imparable avance ruso hacia el este. Para 1834 la ciudad tenía 17.000 habitantes y era la capital de la enorme Siberia Occidental –Siberia Oriental era aún mucho más extensa e incluía Alaska, vendida a los Estados Unidos en 1867–. Tobolsk era y es uno de los puntos de clima más benigno en Siberia, con algunos días de verano de más de 30°. Pero, claro, 20° bajo cero es lo habitual en invierno ¡Y pueden alcanzarse los -50°C! Allí pasó su infancia Dmitri, uno entre catorce hermanos. Su padre falleció cuando él empezaba el secundario, pero al terminarlo su madre lo llevó a San Petersburgo, junto a la costa del mar Báltico, donde pudo cursar sus estudios universitarios.

Ya profesional, **Dmitri Mendeléyev** llevó a cabo investigaciones sobre geología, meteorología, hidrodinámica, transiciones de fase, capilaridad, espectroscopía óptica, química de los explosivos y otras. Pero obvio que ganó su fama tras culminar la tarea iniciada cuando anotó en 63 tarjetas las propiedades de cada uno de los elementos químicos por entonces conocidos. Y jugueteó hasta poder armar el genial rompecabezas: la tabla periódica de los elementos, que publicó en 1868 en su obra “Основхимии” (Osnovjímie), Principios de química. Y luego fue por más y predijo con certeza cuáles elementos faltaba todavía encontrar.

En 1876 Dmitri fue enviado a los Estados Unidos para informarse sobre la extracción del petróleo, la que habría de ser después replicada a los pies de la cordillera del Cáucaso. Además estudió la composición de los hidrocarburos, reconoció su potencialidad como fuente de derivados químicos y colaboró activamente en la fundación de la primera refinera rusa.

Inquieto y multifacético, en 1887 hizo en soledad una travesía en globo para estudiar un eclipse solar. Tuvo hijos y una segunda pareja. Y supo fatigar casi toda Europa para intercambiar ideas científicas. En 1902, ya anciano, viajó a París a fin de conocer las investigaciones de **Marie y Pierre Curie**, pero no lo consiguieron persuadir con su explicación (correcta) sobre el origen de la radiactividad. No lo convencía la idea de que algunas piezas de su bonito encastre pudiesen transformarse espontáneamente en otras.

Treinta y cinco años después eran **Irène Curie** y su marido **Frederic Joliot** (también él premio Nobel, como su



Tobolsk, junto al río Irtysh (foto Vyacheslav Bukharov)

esposa y sus suegros) quienes en París discutían sobre radiactividad con un visitante. En este caso el huésped era **Bruno Pontecorvo**, un joven italiano casado con una estudiante sueca de ideas comunistas. Bruno era judío y había nacido seis años después de la muerte de Dmitri, en 1913, pero en Pisa, la ciudad de Galileo. A la edad de dieciocho conoció a **Enrico Fermi** en un curso que éste impartió en la Universidad romana La Sapienza. Tres años después se unió a los *Ragazzi di via Panisperna* (del latín, pan-jamón), nombre de la calle en la que hace dos milenios se vendía ese menú y donde ahora estaba el instituto en el que esta banda de brillantísimos físicos nucleares (entre ellos **Ettore Majorana**, desaparecido misteriosamente) hizo enormes avances, sobre todo con los neutrones lentos, los más interactivos, fundamento de la fisión atómica. Pero las políticas antisemitas de “*il Duce*” (“el Conductor”) alejaron a muchos, entre ellos Pontecorvo, y desarticulaban torpemente ese epicentro de la ciencia atómica tana.

Los años de Bruno en París acabaron cuando en 1940 la invasión nazi lo obligó a exilarse en Estados Unidos. Entonces se fue a trabajar a Oklahoma en la actividad petrolera y en 1941 publicó su técnica pionera de aplicación de perfilaje neutrónico en pozos, comercializada por la empresa Dresser Atlas. No fue convocado al Proyecto Manhattan posiblemente por las ideas políticas que adoptó de su esposa. Pero en los años siguientes trabajó en Canadá (investigación de la radiación cósmica en Montreal y desarrollo de un reactor nuclear en Chalk River) y luego en Liverpool (con ciudadanía británica, contribuyendo a la primera bomba atómica inglesa). Pero en 1950, durante sus vacaciones en Italia, súbitamente voló con su esposa e hijos de Roma a Estocolmo (Suecia), de ahí a Helsinki (Finlandia) y cruzó por tierra la frontera llevando a la URSS todo su enorme bagaje en ciencia nuclear. Se cree que ya hacía años que les pasaba letra y apuró la movida cuando temió ser descubierto. No pocos infieles a la causa occidental fueron ejecutados –como a la inversa del lado oriental–. Los estadounidenses Julius Rosenberg y su esposa Ethel Greenglass lo fueron en 1953 por espiar para la URSS. Julius falleció ante la primera descarga, Ethel necesitó varias antes de morir en la silla eléctrica. Años después se demostró que ella era inocente, como otros ejecutados en Estados Unidos (151 luego demostrados inocentes en estas últimas cuatro décadas), y muchísimo peor en varios otros países donde rige la pena capital.

Dubná está 120 km al norte de Moscú, junto al río Volga, y había sido destruida por los mongoles en 1238. Para cuando llegó Bruno, hacía apenas meses que operaba el primer



Exterior e interior del edificio del sincrociclotrón de Dubná (fotos Science and Life)

acelerador de partículas ruso y esa ciudad se erigía en epicentro de las investigaciones nucleares de la Unión Soviética. En los años siguientes el italiano se afianzó como máximo teórico mundial de las interacciones de los neutrinos, muones, tauones, piones (quark-antiquark), etc. –con sus implicancias astrofísicas en relación con el nacimiento del Universo y con las supernovas– y sus notables predicciones fueron comprobadas muchos años después. En 1978 pudo comenzar a salir de la URSS y desde entonces, ya con signos del mal de Parkinson, todos los años pudo volver a vacacionar en su Italia natal y ver a sus hermanos, hasta pocos meses antes de su fallecimiento, en 1993. En la fría Dubná descansa la mitad de las cenizas de Bruno. La otra mitad lo hace en la bulliciosa Roma que supo despertar su genio científico.

El premio Nobel les fue negado tanto a Mendeléyev como a Pontecorvo por las cuestiones políticas que suelen desvirtuar tales galardones –al punto que líderes de invasión y muertes han recibido el Nobel de la paz–.

GENÉTICA NUCLEAR

En 1735 el sueco **Carl Linnaeus** tuvo la brillantez de proponer una sistematización lógica de todos los seres vivos en especies, géneros, familias, órdenes, clases. En 1859 el inglés **Charles Darwin** publicó los resultados de su viaje alrededor del mundo a bordo del bergantín HMS Beagle capitaneado por Fitz Roy. La selección natural explicaba genialmente la causa de que la sistemática de Linneo tuviera esa belleza y practicidad.

En química las cosas sucedieron con un siglo de retraso, acaso porque nos es más fácil ver la diferencia entre un pino y un álamo que entre el sodio y el potasio. Como hemos referido, **Dmitri Mendeléyev** hizo la sistemática en 1868. Y la causa de que la tabla periódica funcione de maravilla fue hallada por el inglés **Arthur Eddington** (1920), el alemán **Carl Weizsäcker** (1928), el ucraniano **Gueorgui Gámov** (1938), el alemán **Hans Bethe** (1939) y, entre otros, el inglés **Fred Hoyle** (1946), quienes no dieron la vuelta al mundo, pero desde sus catalejos

astronómicos recorrieron distancias 10^{18} veces mayores que las que navegó Darwin.

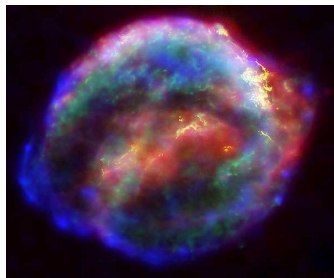
Durante la **nucleosíntesis primordial**, en la Gran Explosión (*Big Bang*) que vertió el Universo hace 13.700 m.a., debieron formarse los isótopos de H, He, Li y algunos del Be en cantidades ínfimas, todo prontísimo, con sólo 1 a 20 minutos de cocción, y luego la temperatura y la densidad cayeron debajo de lo requerido para la fusión nuclear. No se agrupó algo mayor porque no había núcleos con más de 8 bariones estables (protones y neutrones). Las comprobaciones proceden de datos de galaxias enanas (que cambiaron poco su composición), de galaxias y cúasares muy lejanos (cuanto más lejanos, más jóvenes) y de las relaciones barión-protón deducidas de la radiación de fondo de microondas procedentes aún hoy de ese gran horno primordial.

En la **nucleosíntesis estelar** la fusión de 4 protones (núcleos de H) más 2 electrones (tomados del plasma que los contiene) da origen a los núcleos de helio y esto representa el 90% de la energía nuclear generada por una estrella en toda su vida. Mucho después dos He se juntarán para dar Be. Y cuando se amuche otro, producirán carbono. Es el proceso triple α y ocurre arriba de 10^6 °K en estrellas viejas con mucho He, con el H ya consumido, con colapso del núcleo estelar y expansión de las capas externas formando una gigante roja (así le pasará al Sol dentro de $5 \cdot 10^9$ años). Luego el C con otro He producirá O y con otro más dará Ne. Las nucleosíntesis por fusión producen elementos hasta el hierro, el pesado más abundante en el cosmos.

Núcleos con Z mayor al Fe se forman por captura neutrónica en estrellas más masivas que el Sol (proceso-s, *slow*, lento) donde también habría ciclo de cocción C-N-O, añadiendo un H en cada etapa.

La mayor parte del Be, B y Li se ha producido en el espacio interestelar por **astillamiento nuclear** (*spallation*) de carbono, nitrógeno y oxígeno por acción de rayos cósmicos.

Más de la mitad de todos los elementos pesados parece ser producido en las supernovas. Una nova es a ojo desnudo una estrella nueva durante días hasta desvanecerse, debida al volcado gravitacional de masa desde una estrella hacia su compañera



Supernova de Ofiuco (imagen NASA) Nucleosíntesis cósmica dominante (tabla Cmglee)

H	He	Big Bang	Estrellas grandes	Super-novas	He
Li	Be	Rayos cósmicos	Estrellas chicas	Artificial	B C N O F Ne
Na Mg	Al Si P S Cl Ar				
K Ca Sc Ti V Cr Mn Fe Co Ni Cu Zn Ga Ge As Se Br Kr					
Rb Sr Y Zr Nb Mo Tc Ru Rh Pd Ag Cd In Sn Sb Te I Xe					
Cs Ba Hf Ta W Re Os Ir Pt Au Hg Tl Pb Bi Po At Rn					
Fr Ra					
La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu					
Ac Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr					

enana blanca. Una supernova ocurre por la contracción brusca y expulsión consecuente de las capas externas de una estrella muy masiva y es mucho más luminosa que una nova. **Galileo Galilei** mostró la brillantísima supernova de Ofiuco de 1604 como argumento contra el dogma de la inmutabilidad de la creación.

La **nucleosíntesis en supernovas** –comprobada por líneas espectrales tras una expulsión– ocurre durante la combustión de oxígeno y silicio mayormente en la fase explosiva, produciendo por fusión elementos tales como Si, S, Cl, Ar, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co y Ni. Debido a su eyección desde sucesivas supernovas, sus abundancias crecen con el tiempo en el medio interestelar. Los núcleos más pesados que el Ni se forman principalmente por captura rápida de neutrones (proceso-r, *rapid*) en el corazón estelar de hierro, con altísima temperatura y densidad de neutrones. Al final se sintetizan los isótopos más ligeros (pobres en neutrones) de elementos pesados ($Z > 100$) cuya abundancia sería consecuencia de **reacciones de fotodesintegración** causadas por rayos γ sobre los núcleos antes generados. En estrellas con masa colapsada restante mayor a 5 veces la solar el final es un agujero negro: ni siquiera la luz escapa por fuera del radio r , **horizonte de sucesos** calculado en 1916 por el alemán **Karl Schwarzschild**: $r = 2G \cdot m / c^2$ (siendo m la masa estelar)

Se cree que también se produce **nucleosíntesis en estrellas neutrónicas** (formadas con una masa colapsada superior a 1,39 veces la solar según calculó el pakistaní **Subrahmanyan Chandrasekhar** en 1931) si se añaden chorros de H desde una estrella-fuente, debido a la captura rápida de protones (proceso-rp) a más de $2 \cdot 10^9$ °K.

Y la colisión de dos estrellas de neutrones es una minera de oro, platino, uranio y otros núcleos muy pesados.

Por último, la **descomposición radiactiva** también produce nuevos núcleos atómicos. Y los hay **artificiales**.

Retornemos ahora desde la inmensidad cósmica hacia este azulado cascotito recubierto de agua y metámonos en uno de esos agujeritos negros febrilmente horadados en su cáscara.

RADIACIONES SUBTERRÁNEAS

En el perfilaje radiométrico de pozo se aúnan los fenómenos radiactivos con los que Mendeléyev no simpatizaba y las perforaciones petroleras con las que contribuyó mucho.

La industria petrolera se ha caracterizado por el crecimiento, mutación, fusiones y compras entre compañías. Así funciona el capitalismo, concentrando dinero (y poder) en cada vez menos manos. Tal el caso de la estado-unidense Well Surveys, luego devenida Dresser Atlas, después convertida en Western Atlas, más tarde Baker

Atlas y hoy absorbida por Baker Hughes. Esta empresa, una de las referentes del perfilaje de pozo, fue pionera en el desarrollo de herramientas radiactivas. En 1939 **Lynn Howell** y **Alex Frosch** publicaron en los Estados Unidos la técnica de registro de rayos γ naturales que venían desarrollando desde 1935 y que podía ver a través de la cañería en pozos entubados. Y luego llegaron las aplicaciones de Pontecorvo y muchos más.

Como ha sucedido con la resonancia magnética nuclear, también en la radiactividad el desarrollo de las aplicaciones en medicina y las referidas a pozos petroleros han progresado en paralelo.

Entre las diversas herramientas de pozo hay algunas que sólo registran las emisiones propias de las rocas atravesadas (campo natural) y otras llevan una “pastilla” emisora de algún tipo de radiación que interactúa con la formación (campo artificial), para cuyos casos esas **fuentes radiactivas** van en contenedores metálicos protegidos con plomo y se cuenta con protocolos de manipulación que hacen que las operaciones sean seguras.

La profundidad (radio o distancia lateral) de alcance de los rayos γ es de sólo unos 15 cm. Los rayos α y β no atraviesan el lodo. Se registra con **contadores** o bien con **centellómetros**, adaptados a las condiciones de pozo. Las herramientas de densidad van situadas en patines contra la pared y las demás van centralizadas. **Las cavernas darán errores de lectura. Los perfiles neutrónicos y de rayos γ naturales pueden correrse a pozo entubado** (caño y cemento reducen el conteo pero no afectan valores relativos). **Los de densidad sólo a pozo abierto** (en entubado leen cemento). Aquí una síntesis de los más utilizados y luego detalles de cada uno.

EMITE

RECIBE

RAYOS GAMMA NATURALES

—

γ indiscriminados (unidades API: 1/100 lutita Texas)

Alternativo del SP para distinción de capas permeables vs arcillas (con alto % de K^{39} más K^{40} radiactivo).

ESPECTROMÉTRICO de γ Naturales

—

γ en 3 ventanas de Energía: K^{40} a 1,46 MeV

Para distinción de mineralogías:

Bi^{214} (serie U^{238}) a 1,76MeV

calizas, ígneas, UO_2 en M.O.e H.C, relación Th/K en arcillas, etc.

Tl^{208} (serie Th^{232}) a 2,61MeV

DENSIDAD (fuente: Cs^{137} a 0,66MeV)

γ

γ ef. Compton $C_\gamma = I_o \cdot e^{-\mu^x \delta b}$ $\Phi = (\delta m - \delta b) / (\delta m - \delta f)$

Para obtener densidades y calcular porosidades

(Conteo γ , coef. at. másico μ , (Porosid. Φ , dens.matriz δm , int. emisión I_o , dist. fte-rec x) fluido δf y muestreada δb)

LITODENSIDAD (fuente: Co^{60} 1,17-1,33MeV)

γ

γ a 2 niveles de E $\Sigma = k \cdot PEF \cdot \delta e$ $\delta e = \delta b (2Z/A)$

Para obtener densidades, porosidades y además para estimar litologías mediante gráficos cartesianos.

(sección de captura Σ , (dens.electrónica, factor fotoeléctrico PEF) N° átom.y másico)

NEUTRÓNICO TERMAL (fuente: on^1 epit.

on^1 termal (aprox.0,025eV) unids.API: 1/1000 caliza Indiana)

$^{88}Ra^{226} \Rightarrow \alpha, \gamma \Rightarrow ^4Be^9; ^4Be^9 + ^2He^4 \Rightarrow ^6C^{12} + on^1$)

Para calcular porosidades, usualmente en combinación con el perfil de densidad, el cruce de ambas curvas suele indicar la presencia de gas (neutrónico menor, densidad mayor). En arcillas sólo sube el neutrónico.

NEUTRÓNICO EPITERMAL

on^1 epit.

on^1 epitermal (0.1 a 100 eV)

También para cálculo de porosidades, utilizado en litologías complejas por su mejor respuesta ya que los on^1 con más E son menos afectados por las variaciones de Σ y los cálculos de Φ son más valederos.

NEUTRÓNICO-GAMMA

on^1 epit

γ de captura

Es otro perfil para calcular porosidades. Los Cl del agua de Fm emiten γ propios y hacen sobrestimar Φ , pero capturan muchos on^1 por lo que Φ se subestima en los perfiles neutrón-neutrón.

NEUTRÓNICO PULSANTE

pulsos de on^1

on^1 en ventanas de t .

$Cn_2 = Cn_1 \cdot e^{-\Sigma V n^1 t_{2-1}}$

(fuente: acelerador $H^2 \Rightarrow H^3 \Rightarrow on^1$) (1000/s a 14MeV) (a 500 y 800 μ s, compara (veloc. neutrón Vn , intervalo t_{2-1})
Se obtienen valores de Σ y curvas de arcillosidad. las curvas de descenso) Σ en barn, aumenta con Φ y $ClNa$

NEUTRÓNICO-GAMMA INELÁSTICO pulsos de on^1 γ inelásticos y de captura

(fuente: acelerador $H^2 \Rightarrow H^3 \Rightarrow on^1$) (1000/s a 14MeV) Se obtiene composición elemental, Φ , arcillosidad, etc.

PERFILES DE RAYOS GAMMA NATURALES

Son dos, el tradicional de rayos γ totales y el espectrométrico, ambos perfilajes sin emisor, sólo con receptor.

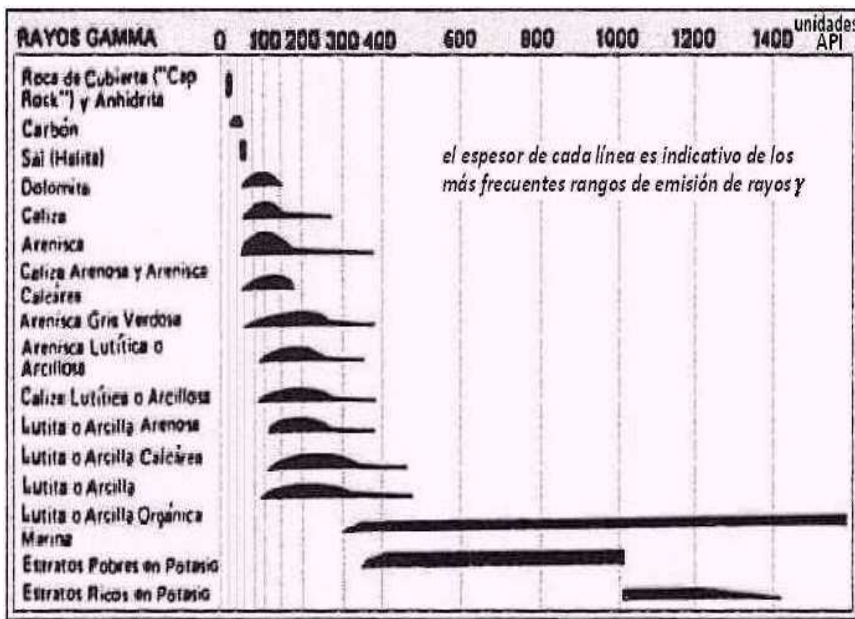
En un pozo la radiación α no es detectable y la β lo es muy débilmente, dado su bajo poder de penetración.

El Perfil de Rayos γ naturales totales o indiscriminados (Gamma Ray, o simplemente GR) data de 1939 y, como adelantamos, fue perfeccionado por Lynn Howelly Alex Frosch. Es una herramienta capaz de registrar la radiación γ natural en su conjunto, cuyo conteo –que tiene una variación estadística– se grafica en un carril o

pista de la hoja de perfiles en unidades API (por el American Petroleum Institute) que se han definido como 1/100 del valor medido en una lutita bituminosa de Texas, Guinness por su fortísima emisión natural.

El perfil de rayos gamma aumenta su conteo en función del aumento de uno o varios de los tres elementos radiactivos más comunes en la Tierra ($^{19}\text{K}^{40}$, $^{90}\text{Th}^{232}$ y $^{92}\text{U}^{238}$). Como ya se mencionó, el potasio está presente en mayor porcentaje en rocas ígneas ácidas, en arcillas, areniscas feldespáticas y metamórficas derivadas de estos grupos. El torio también está principalmente presente en rocas ígneas félsicas y en arcillas, así como en arenas monacíticas y en rocas metamórficas silíceas en general. Y el uranio, además de estar en varias rocas ígneas y metamórficas, se asocia con depósitos sedimentarios propios de ambientes reductores: carbones, lutitas (*shale*) de tipo bituminoso (roca madre, *source rock*), petróleo, así como con fracturas con depósitos de bitumen.

De todas estas opciones, la causa más habitual de aumento de rayos gamma en secuencias sedimentarias es la

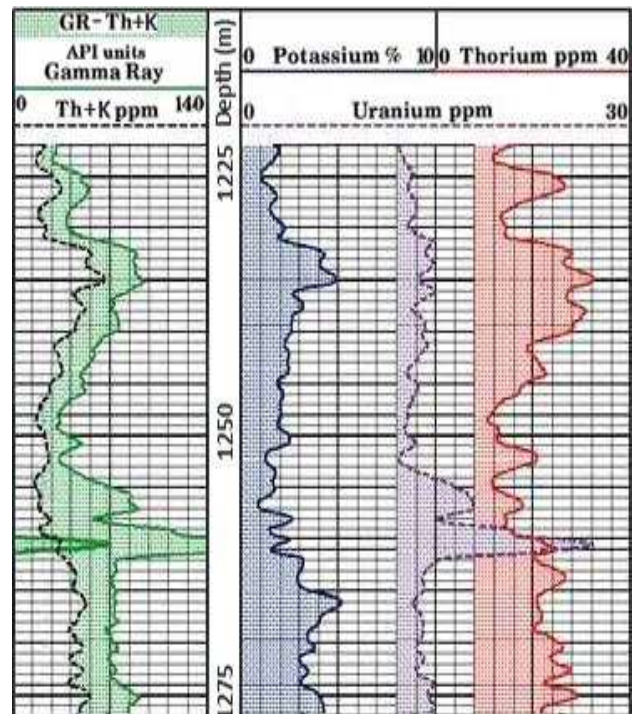


presencia del potasio en las arcillas (sobre todo K^{39} no radiactivo, pero también K^{40} emisor de radiación γ), por lo cual el perfil de rayos gamma se emplea como indicativo de capas impermeables (arcillosas) versus capas permeables, **resultando un perfil alternativo al del potencial espontáneo** si éste no da buenas respuestas (por muy bajo contraste de salinidad entre el lodo y el agua de la formación). Pero, por su conteo estadístico, el perfil γ es de trazado inestable o nervioso. Aparte, es poco claro cuando hay areniscas feldespáticas o tobáceas (caso de los reservorios de la cuenca Golfo San Jorge) que al tener mucho K (y Th) se confunden con arcillas.

Radiación γ natural de rocas en unidades API (modific. de Western Atlas, 1994)

La otra variante es el **Perfil Espectrométrico** de rayos γ naturales, que fue introducido en la industria durante la década de 1960. No emite, sino que sólo detecta la radiación gamma natural –mediante un centellómetro de CsI activado radiactivamente por Na, u otro fósforo equivalente– pero, a diferencia del perfil anterior, éste discrimina la radiación en ventanas de energía, como ya fue explicado. La radiación menos energética corresponde al K^{40} , centrada en 1,46 MeV, la siguiente es la que corresponde con el $^{83}\text{Bi}^{214}$ (de la serie del U^{238}) en torno a los 1,76 MeV, luego la del $^{81}\text{Tl}^{208}$ (que pertenece a la serie del Th^{232}) alrededor de 2,61 MeV, y más allá cae la radiación cósmica (ruido a los fines de la prospección geofísica) con unos 3 MeV.

Esta herramienta es empleada para la distinción de mineralogías, por ejemplo calizas (generalmente pobres en elementos radioactivos) o rocas ígneas (con mayor abundancia relativa de ellos). También para definir los tipos de arcilla en función de la relación Th/K (utilizando gráficas específicas que veremos más adelante) y para detectar la presencia del uranio asociado con la materia orgánica: roca madre, lutitas gasíferas, reservorios petrolíferos, precipitados en fracturas de variada magnitud, etc.



Perfiles de γ espectral: de izquierda a derecha, curvas de K+Th, γ Total (dejando en sombreado verde la diferencia correspondiente al U) y pistas individuales de K, U y Th.

PERFILES DENSIMÉTRICOS

El **Perfil de Densidad** básico (en inglés *density log*, también llamado **Gamma-Gamma**) fue concebido en 1951 en Estados Unidos por **Gerhard Herzog** y **Alexander McKay** (con la idea de hacer mediciones de tipo gravimétrico, aunque luego devino un perfil de porosidad), salió al mercado en 1954 y permite obtener valores de densidad y calcular porosidades a partir de ellos. La herramienta posee una fuente radiactiva, por ejemplo ⁵⁵Cs¹³⁷ que emite rayos γ a 0,66 MeV, y luego registra la radiación γ secundaria (de menor frecuencia) que por efecto Compton emiten los átomos de la formación, menor cuanto mayor sea la densidad electrónica formacional porque el resto se pierde por efecto fotoeléctrico. Esto permite muestrear la densidad en cada punto, proporcional a la δ electrónica. Emisor y detector van sobre un patín apoyado en la pared del pozo. En rigor, desde hace muchos años se utilizan **dispositivos de densidad compensada**, que poseen dos detectores situados a distintas distancias del emisor (figura a la derecha) a fin de dar un promedio de lecturas para compensar los eventuales errores que podrían generarse por la interposición de lodo entre detector y roca, sobre todo si hay cavernas –que si son grandes igual dan error–. La velocidad del perfilaje es baja (unos 500 m/hora) para tener un conteo representativo resultante de promedios estadísticos, lo que aumenta su costo –o sea, reduce la predisposición a correrlo–, y el radio de lectura es corto (de no más de 20 cm). Las relaciones matemáticas son:

$$C\gamma = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot \delta b}$$

(Conteo γ por efecto Compton a partir de la intensidad de emisión I_0 , con coeficiente atómico másico μ , distancia fuente-receptor x y densidad muestreada δb en cada punto)

$$\Phi = (\delta m - \delta b) / (\delta m - \delta f)$$

(Porosidad Φ a partir de las densidades de matriz δm , de fluido δf y muestreada en cada punto de interés δb)

La porosidad calculada siempre incluye los poros de la matriz arcillosa (impermeable), que debemos descontar.

Además puede resultar errónea si hay un cambio litológico

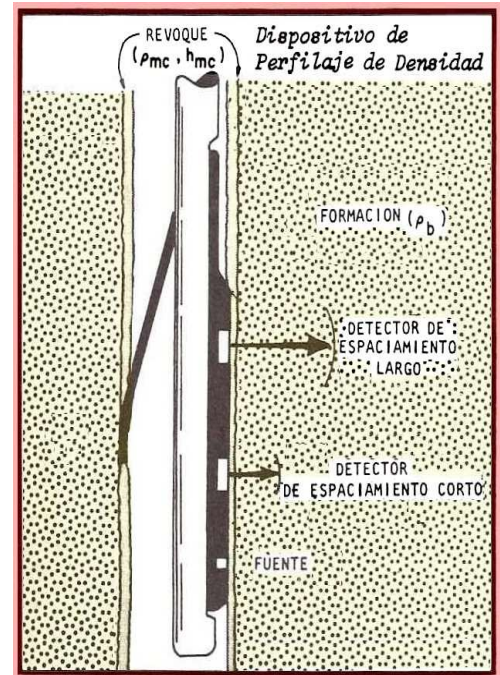
imprevisto. Si, por ejemplo, se calcula en base a una columna clásica con cierta δm y aparece una intercalación de una caliza con porosidad secundaria, tal vez el resultado del numerador dé cero cuando con una adecuada densidad de matriz hubiese dado un cierto valor positivo y un resultado final distinto de cero. O bien, si existe una intercalación de lutitas con materia orgánica, su densidad será menor –por la presencia de cierta proporción de carbono en lugar de silicio– y supondremos que hay una porosidad interesante que en verdad no es tal. Otro caso particular está dado por los lodos densificados con baritina (BaSO₄), que luego dan altas lecturas de δb (por lo tanto baja estimación de Φ) en las zonas de fracturas donde el BaSO₄ se haya depositado.

Una herramienta especial nos permite obtener el llamado **Perfil de Litodensidad** (*lithodensity log*), que utiliza una fuente con mayor rango de emisión energética, por ejemplo ²⁷Co⁶⁰ que emite rayos γ entre 1,17 y 1,33 MeV. De modo que luego se registra la radiación gamma que llega al detector en dos niveles de energía diferenciados, lo que permite estimar litologías en base a estos datos mediante el uso de ábacos o nomogramas diseñados a tal fin. Esto se agrega a los cálculos de densidad y porosidad, como en el perfil más básico. Las demás características de la herramienta y la profundidad de investigación son similares al caso anterior.

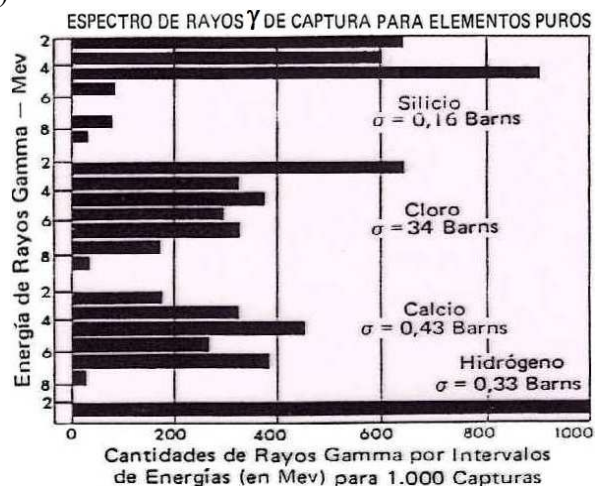
Puede entonces calcularse: $\Sigma = k \cdot PEF \cdot \delta e$

(Σ es la sección eficaz de captura, k una constante, PEF el factor fotoeléctrico y δe la densidad electrónica)

Donde: $\delta e = \delta b(2Z/A)$ (o sea, δe es función de la densidad δb muestreada y los números atómico Z y másico A)



(modificado de Schlumberger, 1972)



(modificado de Western Atlas, 1994)

El PEF (*PhotoElectric Factor*) surge de la cantidad de rayos gamma que sufren absorción fotoeléctrica. Se expresa en barns/Z aunque se suele decir barns/electrón refiriéndose a un átomo en equilibrio eléctrico (no ionizado). Un cálculo práctico adimensional es $PEF = 0,1.Z^{3,6}$. En una roca se toma el valor **Z** del promedio pesado, esto es en función de la abundancia relativa de cada tipo de elemento en la composición litológica. La herramienta registra en dos niveles de energía: el nivel más alto resulta del proceso de efecto fotoeléctrico (captura de rayos gamma y emisión de electrones) sumado al efecto Compton (emisión de rayos gamma secundarios, usados para el cálculo de densidad) y el nivel más bajo sólo es indicativo de la absorción fotoeléctrica (sin efecto Compton) y es el que se usa para determinar el PEF.

El factor fotoeléctrico varía según la litología: es cercano a 5,1 en calizas (valor de la calcita); 3,1 en dolomías (valor de la dolomita); 1,8 en areniscas (valor del cuarzo); 2,8 en feldespatos alcalinos; 4,6 en halita; 5 en anhidrita; 17 en pirita (que obviamente nunca está sola). Por eso este tipo de perfil es útil para ayudar en la discriminación litológica. Incluso varía según el tipo de arcillas: caolinita 1,8; montmorillonita 2,1; illita 3,5; clorita 6,3. En general, dado que los fluidos tienen bajos números atómicos, no influyen mucho en el resultado, que responde fundamentalmente a la matriz rocosa (es decir, clastos más matriz y cemento en términos sedimentológicos) ya que el agua tiene valores de 0,4 a 1,1, según sea su salinidad, el petróleo aproximadamente 0,11 y el gas 0,09. Los minerales pesados dan valores altos, por lo cual sirve como indicación de éstos, pero también **el perfil es afectado por los lodos densificados por baritina** (¡PEF=266!), empleada para prevenir pérdidas de fluido de inyección, ya que ésta se mete en las poros de la zona lavada, cosa que es perjudicial si los reservorios se obturan demasiado, y también puede introducirse en las fracturas, indicando su presencia al saltar a valores muy anómalos en la pista de registro.

Poder tener una mejor idea de la litología es útil además para mejorar el cálculo de la porosidad basado en una herramienta de densidad (en este caso litodensidad) porque se logra definir mejor la composición.

El ejemplo de la pág.264 muestra el factor fotoeléctrico manteniéndose constantemente bajo cuando se está frente a areniscas sedimentadas en ambientes continentales (para distintos valores de la relación Th/K) y que varía desde valores bajos a elevados en areniscas marinas (glaucioníticas, con relaciones Th/K más bajas que si las secuencias son continentales), lo cual es debido a que la glauconita contiene en su estructura molecular algunos elementos pesados, sobre todo hierro.

A los fines didácticos vemos a la derecha un ábaco para la estimación de la porosidad en el reservorio cuando éste es gasífero, si bien hoy esto se resuelve con las fórmulas cargadas en el programa de la compu. No olvidar corregir por la eventual matriz arcillosa. La Gerencia no estará feliz si punzamos en capas tapadas con bocha de arcilla.

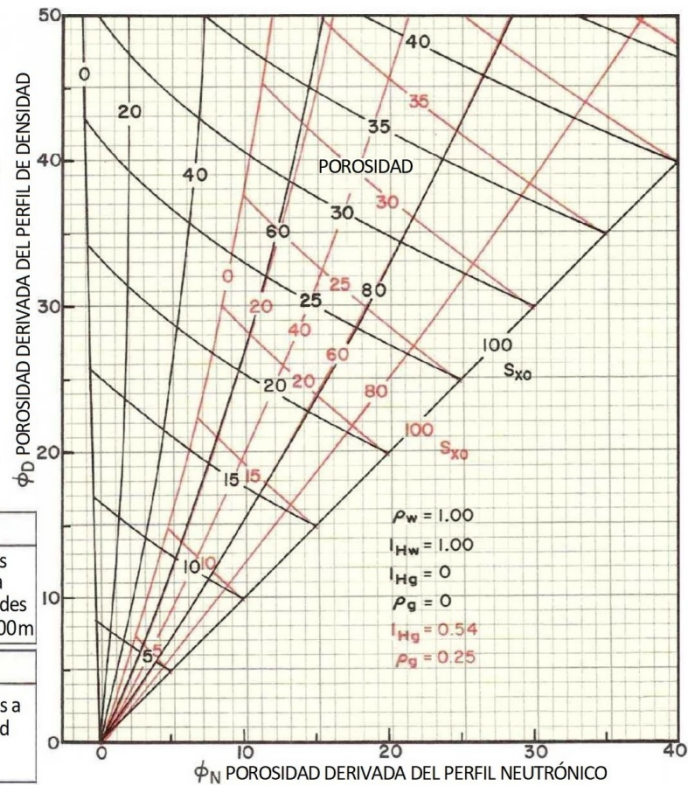
FORMACIONES GASÍFERAS, POROSIDAD A PARTIR DE LOS PERFILES NEUTRÓNICO Y DE DENSIDAD

Entrar al ábaco con valores de porosidad corregidos por matriz y S_{xo} (saturación promedio de agua en la zona lavada).

El ábaco asume agua dulce y gas de composición CH_4 , e incluye la corrección del perfil neutrónico por el efecto del reemplazo de la matriz por gas.

Condiciones representadas por las curvas:

NEGRO		
Presión	Temp.	Condiciones promedio a profundidades de 300 a 1400 m
2,000 psi	120°F	
13,790 kPa	49°C	
ROJO		
Presión	Temp.	Condiciones a profundidad de 4500 m
7,000 psi	240°F	
48,263 kPa	116°C	



(modificado de Schlumberger, 1979)

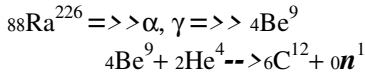
PERFILES NEUTRÓNICOS

Existen cinco variedades de perfiles neutrónicos y **todos nos permiten calcular densidad y porosidad de las formaciones atravesadas por el sondeo, usualmente en combinación con el perfil de densidad** antes descripto. Todos los neutrónicos poseen dispositivos de compensación de lecturas análogos a los que tienen los perfiles de densidad, su velocidad de perfilaje es baja y su profundidad de investigación también de unos 20 cm. La información registrada suele indicarse en unidades API: 1/1.000 de una caliza radiactiva de Indiana (USA).

En los perfiles acá a la derecha se han interpretado variadas litologías en base a un perfil de rayos γ naturales y uno neutrónico. Otra gráfica ilustrativa se halla en la pág.223, Tema 06-07-08(b).

Veamos ahora los cinco neutrónicos.

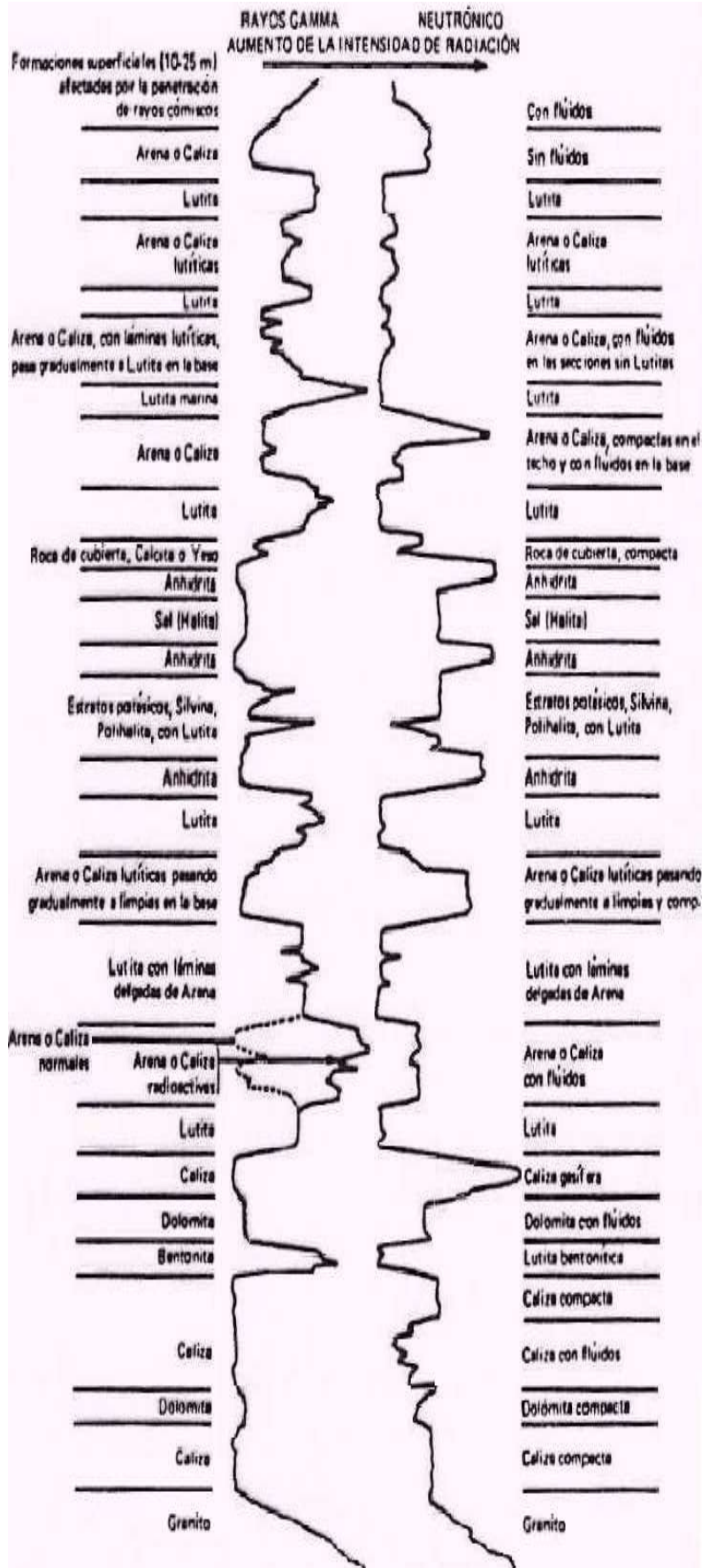
El **Perfil Neutrónico Termal** (*neutrón termal log*) que fue publicado por **Bruno Pontecorvo** en 1941, posee una fuente de $^{88}\text{Ra}^{226}$ (alternativamente $^{95}\text{Am}^{246}$ o $^{94}\text{Pu}^{239}$ como la bomba arrojada sobre Nagasaki) emitiendo radiación α y γ , la cual bombardea átomos de $^4\text{Be}^9$, por lo cual éstos a su vez emiten una nube de neutrones (n^1) de energías intermedias (termales) y mutan a átomos de $^{12}\text{C}^{12}$:



Los neutrones son emitidos en el rango de energía epitermal (0.1 a 100 eV) y se registra en un rango energético menor (termal, de unos 0,025 eV) al cual llegan tras ser moderados por la formación.

Se lo emplea para calcular porosidades, basándose en el conteo de los neutrones recibidos que disminuye con el aumento del llamado **índice de hidrógeno**. Éste es función de la presencia de átomos de H (contenidos en los hidrocarburos o el agua), que frenan a los neutrones enviados a causa del momento cinético por tener una masa semejante. Es decir, a mayor cantidad de hidrógeno, menor conteo de neutrones y mayor porosidad. La pérdida de energía viene dada por: $-\Delta E = 4Z/(1+Z)^2$

El hidrógeno da cociente 1 (100%), pero otros elementos dan valores sensiblemente menores, tanto menos cuanto mayor sea el número atómico: un neutrón se amortigua más al chocar contra un protón (de similar masa) que contra un núcleo grande, es decir, mucho más masivo. Es habitual combinar el perfil neutrónico con el perfil de densidad **–perfilaje sinérgico–**. El cruce de ambas curvas suele indicar la presencia de gas (pista de Φ_N y Φ_D en la figura siguiente). Esto es así porque, ante capas gasíferas, el neutrónico mide menos porosidad a raíz de que disminuye poco el conteo de neutrones: el índice de H resulta menor ya que existe una menor densidad de éste en el gas que en el agua o el petróleo. Pero, en cambio, el perfil de densidad da mayor porosidad porque, por



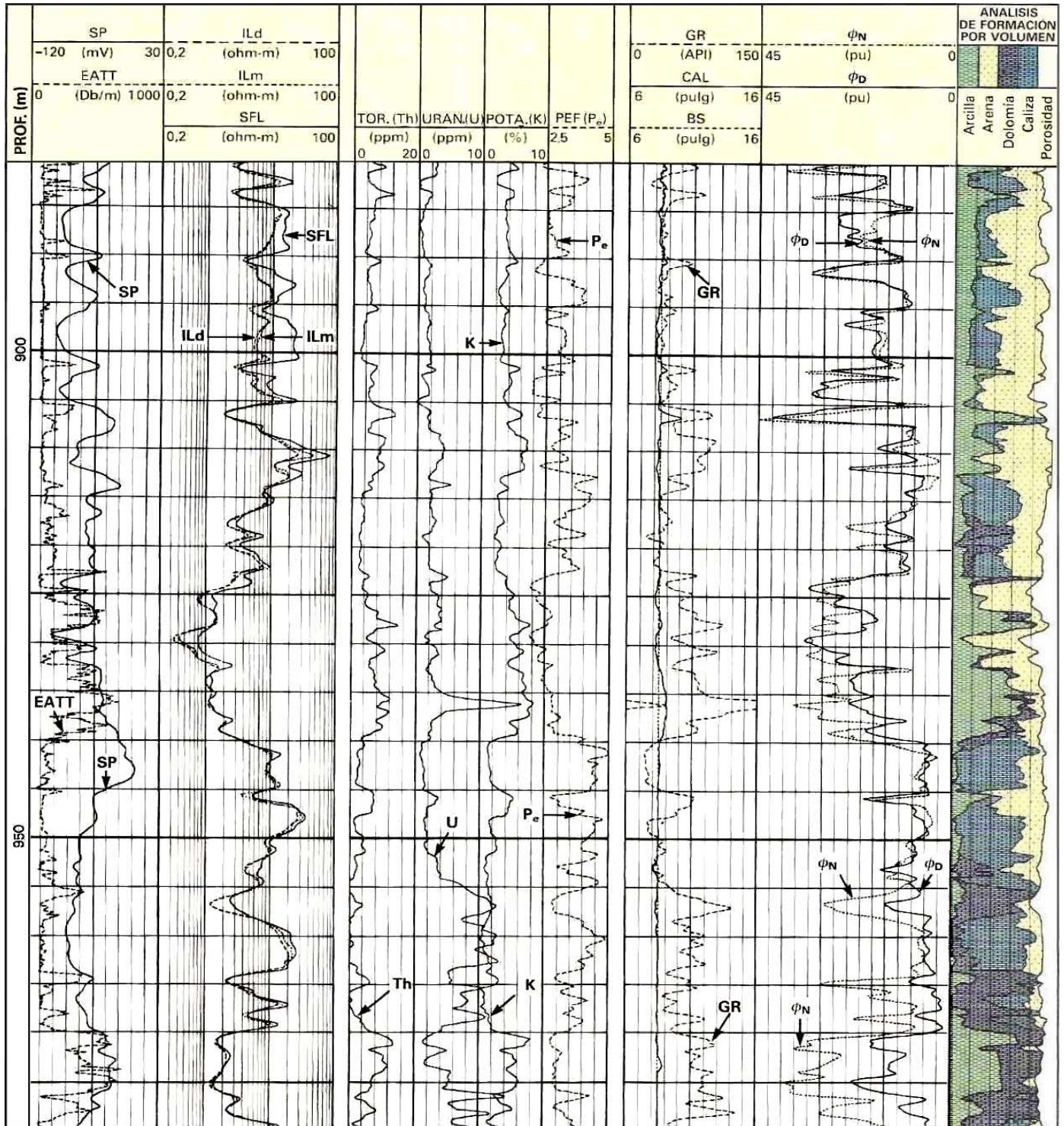
Respuestas típicas de los perfiles neutrónicos y de rayos γ naturales para distintas litologías (modificado de Western Atlas, 1994)

defecto, se asigna en la fórmula de cálculo una densidad de fluido correspondiente al agua de formación (de alrededor de $1,03 \text{ g/cm}^3$, o sea mayor que la del gas, cercana a $0,66 \text{ g/cm}^3$), densidad que aparece restando en este caso por exceso en el denominador.

Lo mismo sucede por intercalación de una toba poco densa, con bajo índice de H y alta Φ_D (menor δb).

Frente a las arcillas, en cambio, sólo sube la medida del perfil neutrónico, en razón de que el agua poral aumenta el índice de hidrógeno y por tanto disminuye el conteo de neutrones.

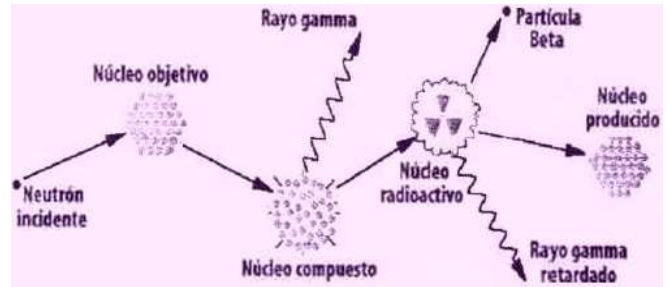
Debe tenerse presente que *los iones Cl de las aguas del subsuelo también capturan neutrones*, reforzando el efecto del hidrógeno, motivo por el que finalmente *resulta sobrestimada la porosidad formacional*.



Perfiles de SP y atenuación (EATT); inducción profunda, media y enfocada; Th, U, K y factor fotoeléctrico; rayos γ total, calibre de pozo y diámetro de trépano (Bit Size); porosidades D y N, y computación litológica (modificado de Schlumberger, 1987)

El **Perfil Neutrónico Epitermal** (*epithermal neutron log*) es una alternativa, desarrollada en 1952 en Estados Unidos por **Charles Tittle**, que emite energía en el mismo nivel energético del anterior, pero que, a diferencia de aquel, registra también en el rango de las energías epitermales (como se dijo, mayores que las termales).

Usado también para el cálculo de porosidades, utilizado en litologías complejas por su mejor respuesta ya que los neutrones con más energía son menos afectados por las variaciones de Σ y los cálculos de porosidad Φ son más valederos. Sin embargo, téngase presente que, tanto en este perfil como en el anterior, los iones Cl⁻ de las aguas del subsuelo capturan muchos neutrones, razón por la que finalmente resulta sobrestimada la porosidad. También esta variante del neutrónico se combina con el perfil de densidad en el perfilaje sinérgico.



PÉRDIDAS DE ENERGÍA DE NEUTRONES				
Elemento	Cantidad Promedio de Colisiones	Máxima Pérdida de Energía por Colisión	Peso Atómico	Número Atómico
Calcio	371	8%	40,1	20
Cloro	316	10%	35,5	17
Silicio	261	12%	28,1	14
Oxígeno	150	21%	16,0	8
Carbono	115	28%	12,0	6
Hidrógeno	18	100%	1,0	1

(Hidrógeno: la pérdida promedio debida a colisiones angulares es de 63%)
(modificado de Western Atlas, 1994)

El **Perfil Neutrónico-Gamma** (*neutron-gamma log*) emite neutrones epitermales, como los anteriores, pero recibe radiación γ (de captura) que eyecta la formación como consecuencia del bombardeo de neutrones, cuando éstos disminuyen su estado energético y son capturados en la formación. Es otro perfil empleado para calcular porosidades, pero debe tenerse presente que **los iones Cl⁻ del agua de las formaciones emiten rayos γ y en consecuencia hacen sobrestimar la porosidad**, al igual que resulta de los dos perfiles neutrón-neutrón.

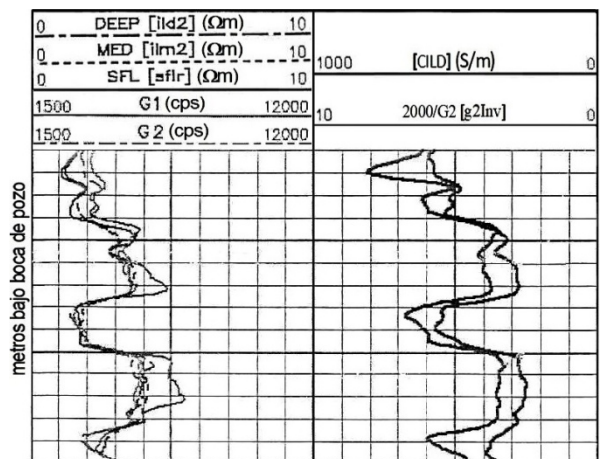
El **Perfil Neutrónico Pulsante** (*pulsed neutron log*) fue ideado en Estados Unidos en 1962 por **Arthur Youmans** y varios colaboradores y fue comercializado desde 1963. Tiene una fuente constituida por un acelerador de átomos de deuterio con los que se bombardea un blanco de tritio, a partir del cual se produce la emisión de pulsos de neutrones (unos 1.000 por segundo a energías de 14,1 MeV): $H^2 \Rightarrow H^3 \Rightarrow \alpha n^1$

Se registran neutrones en una ventana temporal entre dos compuertas (tiempos de registro, usualmente entre unos 500 y 800 μ s) obteniéndose la correspondiente curva de descenso para cada punto muestreado a lo largo del pozo. El conteo de neutrones en cps (cuentas por segundo) responde a la ecuación: $Cn_2 = Cn_1 \cdot e^{-\Sigma v_n t_{2-1}}$

(el conteo en un instante 2 se relaciona con el obtenido en un instante 1 según una exponencial decreciente donde Σ es la sección eficaz de captura, v_n la velocidad de los neutrones y t_{2-1} el intervalo de tiempo elegido)

Se obtienen valores de la **sección eficaz de captura** (Σ , que es la probabilidad de la interacción, función del átomo considerado y de la energía involucrada). Para los niveles de energía usuales en estos registros, en areniscas Σ varía entre 8 y 13 barn (1 barn = $10^{-28} m^2$), en arcillitas de 20 a 40, en calizas de 8 a 10, y en reservorios de agua dulce o petróleo es de unos 20 a 25 barn. **Este valor aumenta a medida que se incrementa la porosidad y asimismo con el aumento de la salinidad.**

Es un perfil especialmente indicado para ser corrido a pozo entubado, lo cual puede hacerse junto con el perfilaje de calidad de la cementación. Pueden registrarse datos a dos profundidades de investigación distintas (G1 y G2 en el ejemplo adyacente), una de ellas mucho más larga que la convencional en perfiles radiactivos, lo cual **brinda datos comparables con los de herramientas de resistividad** y la convierte en una apropiada información para hacer la correlación entre pozos. Obsérvese la similitud entre las curvas neutrónicas y de inducción, tanto en el carril izquierdo como en el derecho. El tiempo de degradación termal τ (en micro-segundos) surge de hacer: $\tau = 4,55 / \Sigma$. Resulta una buena información para poder **discriminar la presencia de hidrocarburos** con respecto al agua en la formación, como se aprecia en el siguiente ejemplo que fue



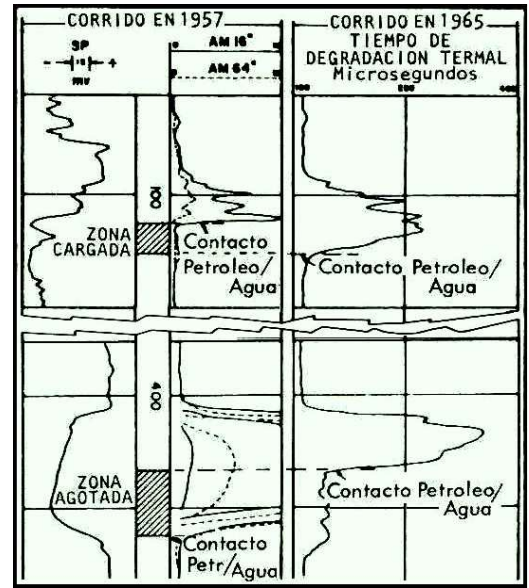
Curvas G1, G2 y 2000/G2 obtenidas a pozo entubado (neutrónico pulsante). Las demás a pozo abierto (perfil de inducción). cps: cuentas/segundo
(modificado de Baker Atlas)

corrido en distintos años, con un cambio de la interfaz agua/petróleo debido a la explotación del recurso (figura derecha).

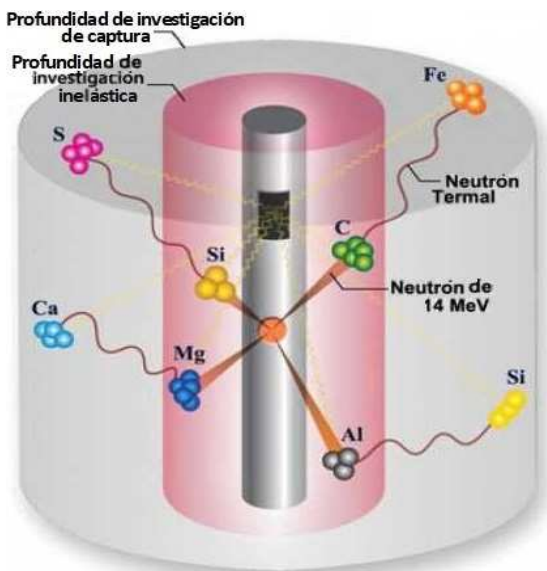
A partir de los perfiles neutrónicos pulsantes también *es posible obtener curvas de arcillosidad* gracias a su muy alto Σ .

El **Perfil Neutrónico-Gamma Inelástico** (*inelastic neutron-gamma log*) o **de Carbono/Oxígeno** fue ideado en la década de 1970 pero sólo ha comenzado a ser comercializado después del año 2000. Utiliza como fuente pulsos neutrónicos de 14,1 MeV a partir de una fuente deuterio-tritio (como en el caso anterior) pulsos que, como consecuencia de su interacción con las rocas, generan dos tipos de rayos gamma que son registrados por un centellómetro con un fósforo orgánico o bien de óxido de bismuto y germanio (BGO). Debe correrse con pozo abierto en buenas condiciones o bien a pozo entubado.

Cerca de la pared del pozo (*hasta unos 10 cm*, variando en más o en menos según el diámetro del hueco) *se producen los rayos γ de comportamiento inelástico*, originados por la captura de los neutrones rápidos (*muy energéticos*, con más de 1 MeV) que producen un estado atómico excitado, tras lo cual se emiten neutrones menos energéticos y luego rayos γ (de origen inelástico). En cambio, *algo más lejos los neutrones emitidos pierden energía* (se tornan más lentos, llegan al rango termal) y *se producen rayos γ de captura*, como se ilustra, a causa de la captura de neutrones tal como en el perfil neutrón-gamma. El **espectro energético obtenido** se distribuye en 256 canales que entonces permiten discriminar fracciones de pesos secos elementales de la formación. Luego, con un programa cuyos parámetros se ajustan al conocimiento previo de cada yacimiento, *pueden hacerse estimaciones de las composiciones mineralógicas probables*.



(modificado de Schlumberger, 1972)

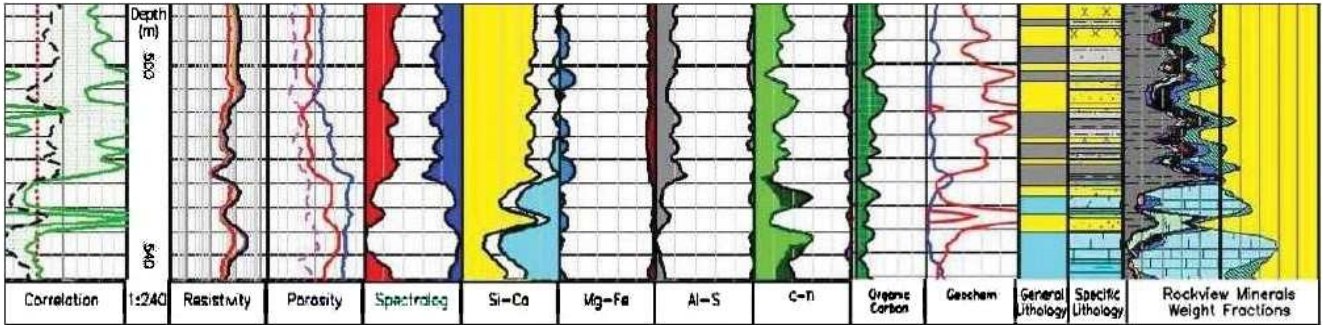


Interacción de los neutrones con la formación (figuras modificadas de Baker Atlas)

Elementos detectados mediante los registros Spectralog y FleX			
Elemento	Espectro de captura	Espectro inelástico	Espectro natural
Aluminio	Al	Al	
Calcio	Ca	Ca	
Carbono		C	
Cloro	Cl		
Gadolinio	Gd		
Hidrógeno	H		
Hierro	Fe	Fe	
Magnesio	Mg	Mg	
Manganeso	Mn		
Oxígeno		O	
Potasio	K		K
Silicio	Si	Si	
Azufre	S	S	
Torio			Th
Titanio	Ti	Ti	
Uranio			U

Los elementos en azul son los resultados primarios del análisis

Los datos registrados por el perfil proveen información sobre la presencia relativa de muchos elementos (figura de la derecha). Con esos datos se puede obtener una estimación de saturación de petróleo, relación C/O, litología aproximada a partir de la relación Si/(Ca+Si), porosidad mediante H/(Ca+Si), arcilla empleando Fe/(Ca+Si) y salinidad calculando Cl/H, entre otras posibles opciones composicionales. **La información es útil para diseñar los programas de terminación y estimulación más apropiados** según la presencia o ausencia de ciertos minerales de la matriz rocosa. Por ejemplo, los minerales ricos en hierro como siderita o clorita desaconsejan el empleo de ácido porque el Fe podría precipitar obturando poros y disminuyendo la permeabilidad. **También es importante en reservorios no convencionales** como los de gas en lutitas, metano en capas carboníferas o los que poseen petróleo pesado. A **Dmitri Mendeléyev** le habría encantado verlo.



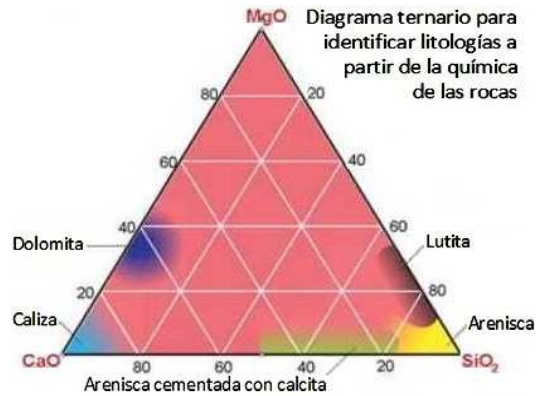
Presentación resultante de un perfilaje neutrónico- γ inelástico (más perfilaje de resistividad) incluyendo interpretación mineralógica y litológica computada, y cantidad de kerógeno presente en las lutitas Barnett, cuenca Fort Worth, Texas. (figuras modificadas de Baker Atlas)

Arriba y derecha, manejo de los datos composicionales.

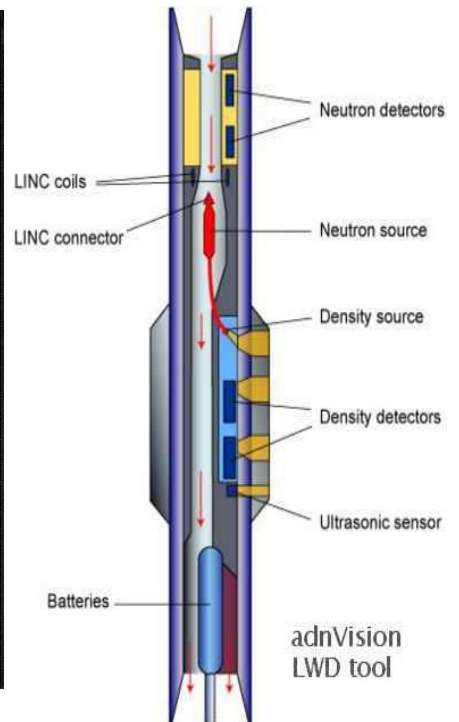
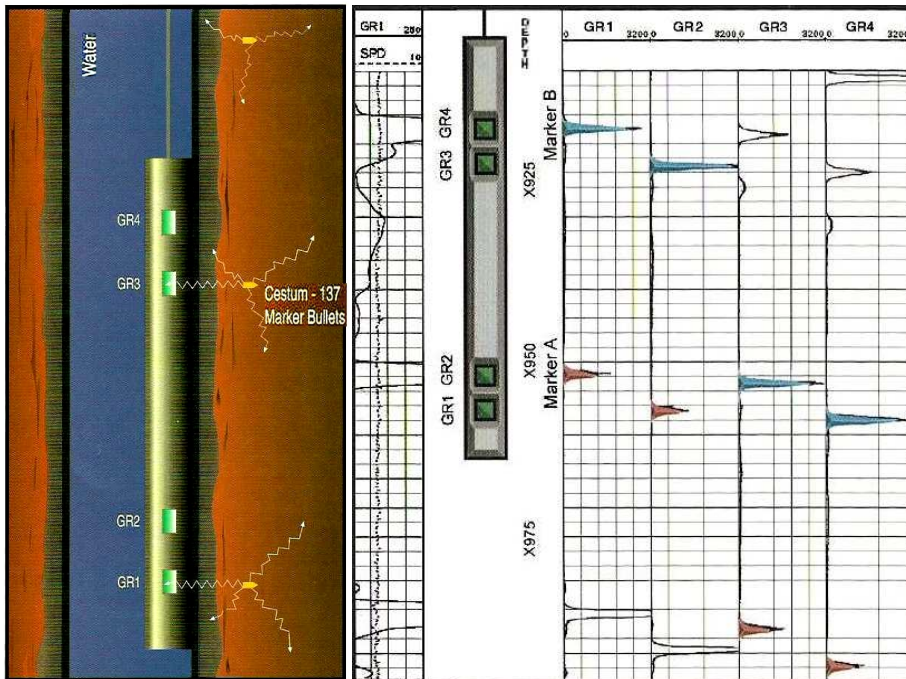
OTRAS APLICACIONES

Perfilaje radiactivo durante la perforación

Pueden bajarse herramientas de rayos γ , de densidad o neutrónicas adaptadas para registrar por encima del trépano de perforación. Los datos obtenidos no tienen la misma calidad que aquellos adquiridos convencionalmente, pero tienen la ventaja de disponerse al instante, algo que es crítico cuando se deben tomar decisiones operativas con muy poco margen de error. A la derecha, uno de tales fierros.



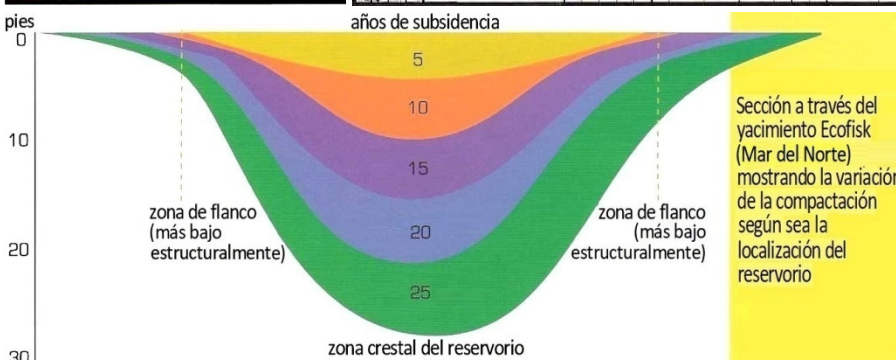
Perfilaje en el campo Ecofisk (modific. de Pemper *et al.*, 1998)



Herramienta para perfilar al perforar.

Aplicación no convencional

Se trata de la cuantificación de la compactación ocurrida en campos petroleros tomando pozos testigo donde un cañón mucho tiempo antes introdujo balas radiactivas a intervalos dados (izquierda arriba, para un caso del mar del Norte).



Sección a través del yacimiento Ecofisk (Mar del Norte) mostrando la variación de la compactación según sea la localización del reservorio

Entonces se baja cada cierto período la herramienta de perfilaje con detectores de la radiación γ : la fuerte señal que emiten las balas indica inequívocamente su ubicación en profundidad, la cual se va modificando entre cada medición y la siguiente en función del grado de compactación que va ocurriendo a medida que progresa la extracción de los fluidos producibles del yacimiento (drenaje o *depletion*). La última figura de la página anterior muestra el modelo de compactación resultante de estas mediciones.

Tomografías neutrónicas y con rayos X y γ

Son aplicaciones relativamente recientes empleadas para el estudio de la distribución de mineralogías, porosidad, fisuración, cristalografía y otras propiedades dentro de los núcleos de roca extraídos de una perforación para petróleo, minerales metalíferos, fundaciones, arqueología, etc.



norita anortosita
Transparencias neutrónicas
(imagen De Beer & Ameglio, 2011)

EVALUACIÓN MINERALÓGICA ESPECTROMÉTRICA

Metodología

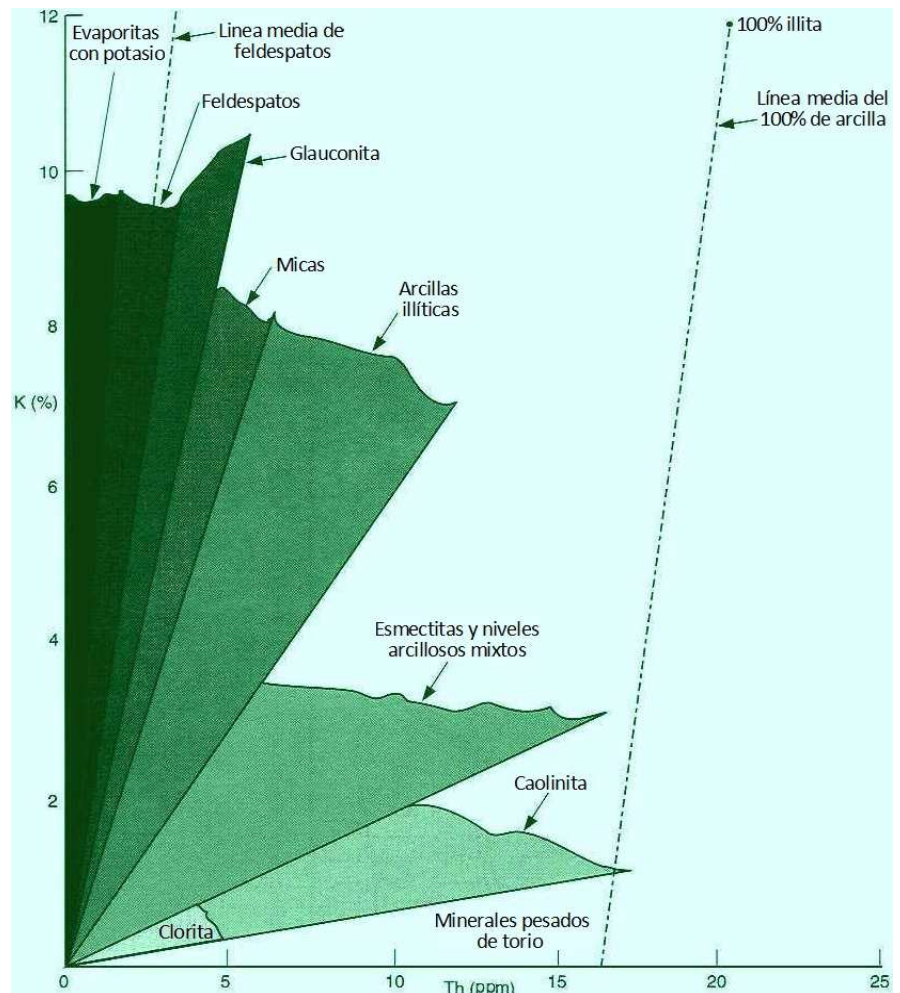
Cada uno de los elementos radiactivos presentes en las arcillas emite rayos gamma con un nivel de energía que le es característico. Las herramientas espectrométricas clasifican los rayos γ naturales en ventanas de energía. De este modo identifican y cuantifican los tres elementos radiactivos principales presentes en la formación: torio, uranio y potasio. Dicho de otro modo, el nivel de energía de la radiación determina de qué elemento proviene y la cantidad de rayos por segundo define la cantidad de dicho elemento presente en la formación. *Se grafica el K total (el ^{40}K es el 0,01% de ese total). El ^{232}Th es ya el total de Th en la roca.*

Por otro lado, los diferentes minerales de arcilla se caracterizan por un valor determinado de la relación Th/K. Entonces dicha relación permite clasificar y estimar porcentajes de abundancia de cada uno de los mismos. En la siguiente figura se muestra cómo se ubican los diferentes tipos de arcillas y otros minerales (evaporitas, pesados de Th, etc.) en un gráfico torio-potasio. Los programas informáticos asumen que un dado mineral puro es graficado sobre una única línea (una cierta relación Th/K) ubicada en el centro del sector correspondiente a dicha especie mineralógica.

Los puntos que verdaderamente mide la herramienta de pozo en general quedan en medio de dos líneas, y lo que efectúa el programa es el cálculo de la proporción de cada uno de los minerales correspondientes a esas distintas líneas en función de las distancias del punto a cada una de ellas.

Existe la posibilidad de eliminar determinados componentes de los cuales se tenga la certeza de hallarse presentes dentro de la formación analizada.

Los programas también toman en cuenta el factor fotoeléctrico, provisto por la herramienta de litodensidad, a fin de discriminar entre sí a aquellas arcillas que pudieran poseer valores similares de relación Th/K, como es el caso de las esmectitas y los niveles arcillosos mixtos (*mixed layer clays*).



Relación Torio-Potasio para identificar tipos de arcillas y otros minerales (modificado de Baker Atlas)

Limitaciones de las determinaciones

En la figura anterior se puede ver que todas las líneas correspondientes a los distintos minerales de arcilla convergen en el origen (cero de torio y de potasio). En este punto caería una arenisca cuarzosa limpia. Obviamente, cuanto más limpia sea, tanto más se acercará al origen, donde se juntan todas las líneas. Esto hace que cualquier error de medición, aun pequeño, cause incertidumbre en la determinación del tipo de arcilla, porque todas convergen en el referido punto. Es decir, cuanto más limpia es la arena, tanto mayor es la incertidumbre en la determinación del tipo de arcilla. Esto hay que tenerlo en cuenta si se quiere calibrar con testigos-corona pues normalmente estos núcleos rocosos son extraídos donde hay areniscas. Pero, como contrapartida, es el tipo de incertidumbre que desea tener un reservorista, porque significa que la arenisca no verá mermada su porosidad –ni permeabilidad– como consecuencia de su matriz intersticial arcillosa.

Sin embargo en la cuenca Golfo San Jorge hay un error más importante: las areniscas en general son lítico-feldespáticas (tobáceas) y por tanto presentan niveles de radiactividad natural con frecuencia similares y hasta mayores que las arcillitas (también tobáceas o piroclásticas), por lo cual su espectro radiactivo arroja resultados erróneos al analizarse según un modelo diseñado para arcillas clásticas cuarzo-feldespáticas donde el cambio granulométrico sí conlleva un aumento de minerales arcillosos, laminares, que viajan suspendidos en el agua.

Por todo lo referido, los resultados en las areniscas deben ser tomados con precaución. El tipo de arcilla presente en las mismas podría ser mejor inferido de las arcillitas vecinas de la columna sedimentaria.

Ejemplo de análisis de resultados

En todo el intervalo registrado no se observan grandes variaciones en las curvas de torio y potasio, y la misma observación se puede hacer mediante el gráfico de puntos o *crossplot* general (derecha) donde se ve una única nube de puntitos. Esto en principio permite inferir que no existen grandes variaciones del tipo de arcilla a lo largo de la columna.

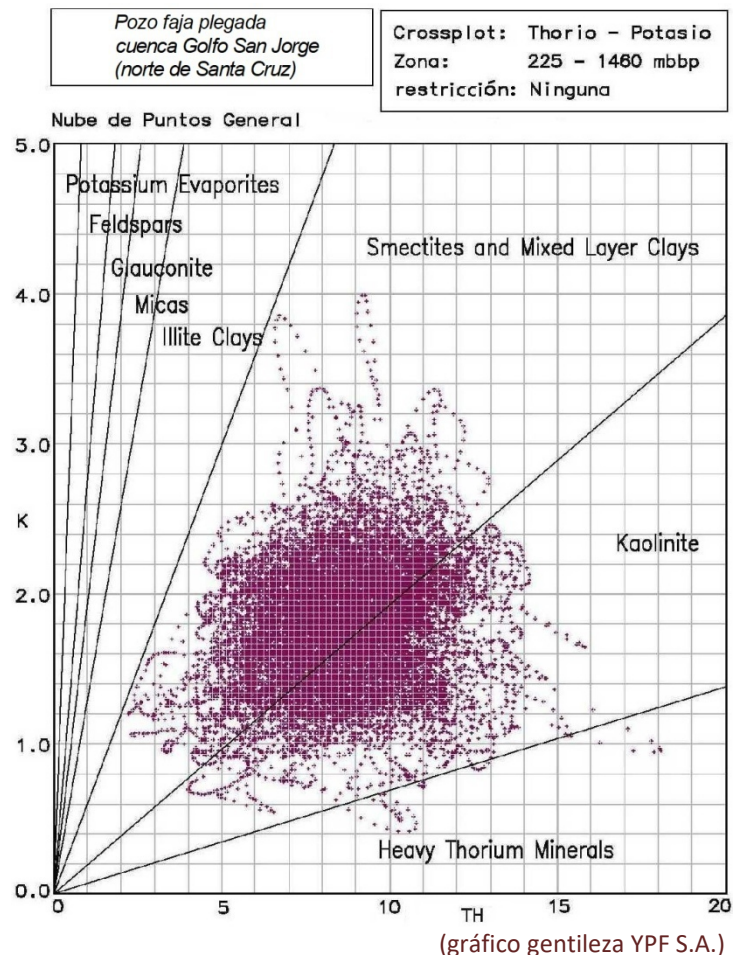
De los tres componentes radiactivos, la curva que muestra más variaciones es la de uranio pues presenta zonas de valores altos que se dan siempre que el *GR* (registro de rayos gamma naturales indiscriminados) presenta valores altos. Ejemplos: 385 a 400 mbbp (metros bajo boca de pozo), 640 a 675 mbbp, 1.095 a 1.100 mbbp, etc. Entonces se puede afirmar que el uranio es el único elemento que causa los valores anormalmente altos de los rayos γ .

Por encima de los 700 mbbp no se registró el perfil de litodensidad, razón por la cual en este intervalo no puede hacerse la diferenciación entre esmectitas y niveles arcillosos mixtos. Es por eso que en la presentación gráfica aparece el componente *mixed layer clays / smectites*: una combinación indefinida de ambos. Empero, extrapolando el tramo que tiene todos los perfiles, se podría interpretar que lo que más abunda dentro de esa combinación indefinida son los niveles arcillosos mixtos.

(Las esmectitas pueden indicar paleosuelos y también derivar de la alteración de vidrios volcánicos).

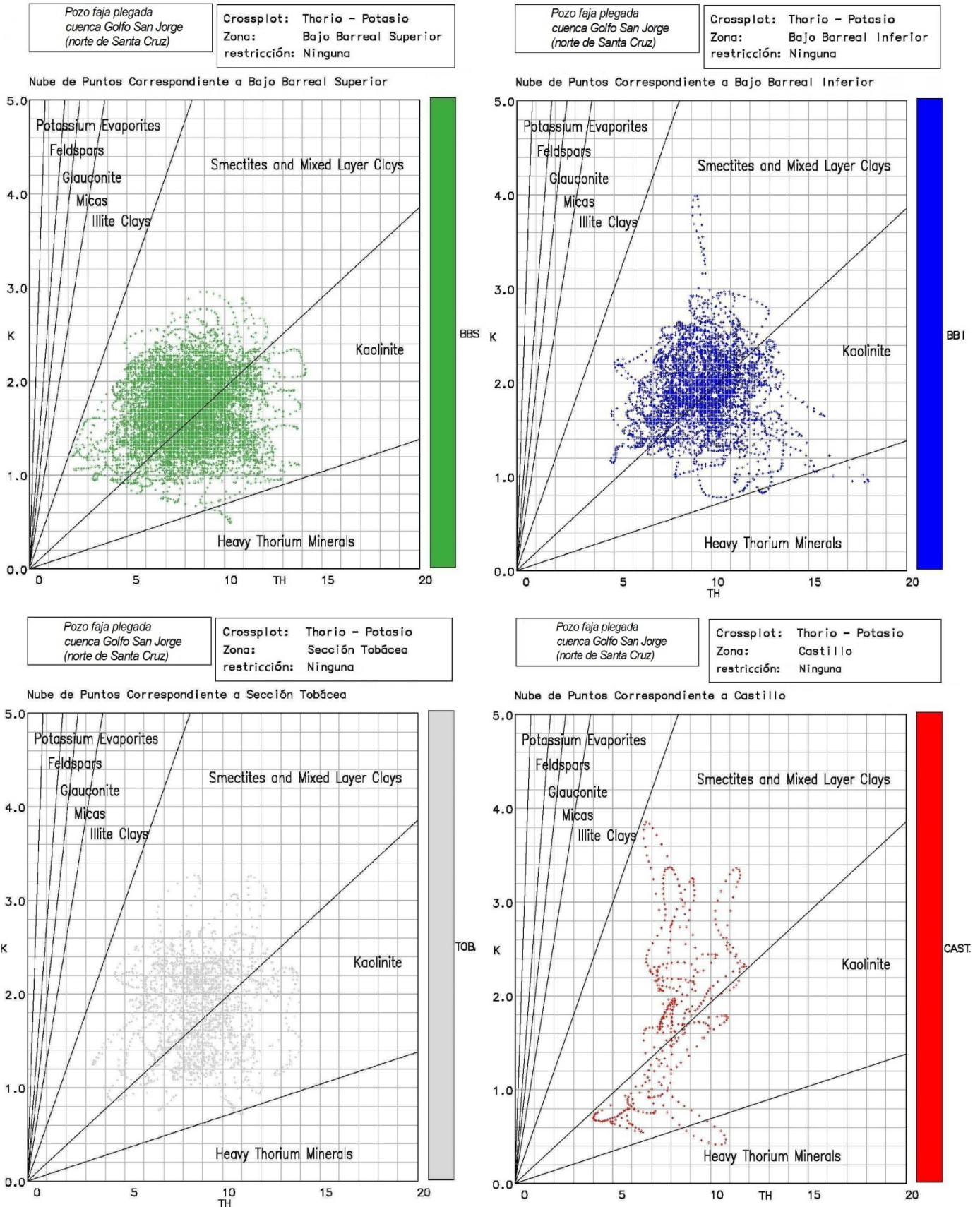
Con el objeto de poder analizar pequeñas variaciones en los tipos de arcillas asociadas a las formaciones perfiladas se desglosó el diagrama general en las siguientes unidades formacionales:

Bajo Barreal Superior	desde tope de registro hasta 925 mbbp
Bajo Barreal Inferior	desde 925 hasta 1.258 mbbp
Sección Tobácea	desde 1.258 hasta 1.425 mbbp.
Castillo	desde 1.425 mbbp hasta fondo de pozo



En la figura anterior y en todas las que siguen se observa el mismo gráfico general, con la diferencia de que las unidades formacionales se han codificado por colores. No se indican restricciones (*constraints*) en ningún caso. Se hicieron cuatro gráficos cartesianos separados, uno por cada unidad, como se ve.

(gráficos gentileza YPF S.A.)



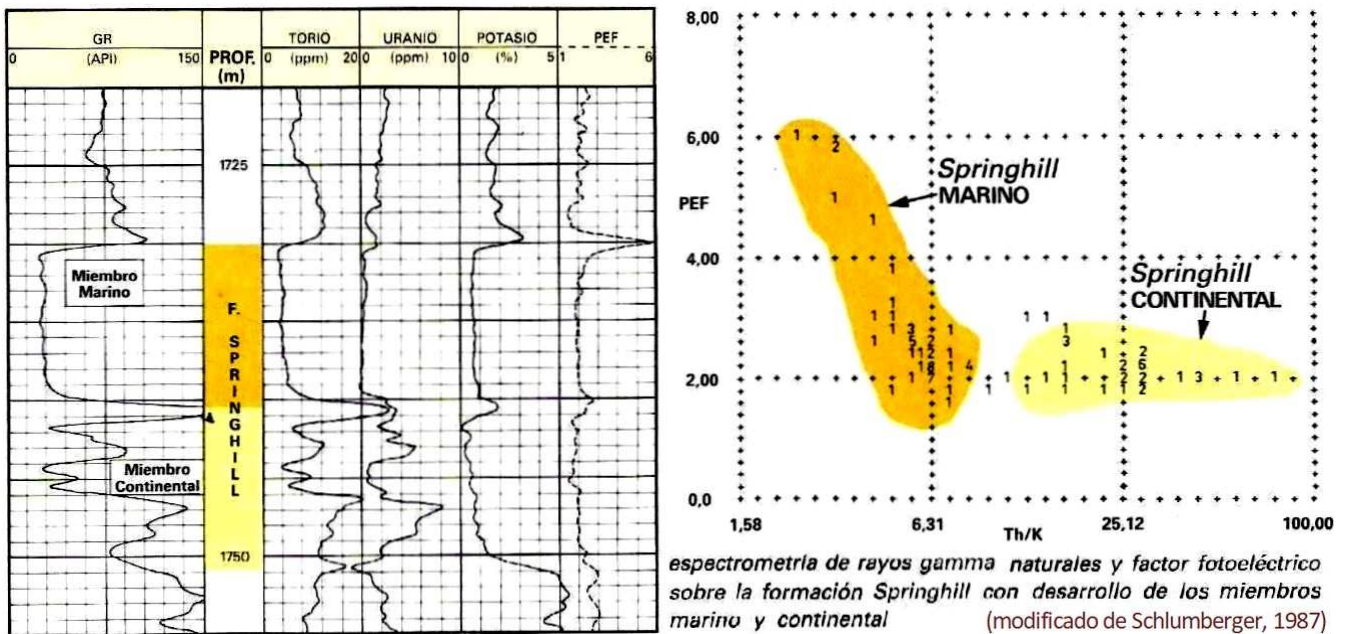
Estos gráficos de puntos cartesianos o *crossplots* confirman que las nubes de puntos correspondientes a las distintas formaciones caen todas en la misma zona; la excepción podría ser Castillo (en la última figura) pero no se puede asegurar ni refutar pues el pozo penetra muy poco en dicha formación y la nube de puntitos correspondiente se hace dispersa debido a la poca cantidad de datos.

Aplicaciones prácticas de la interpretación de tipos de arcillas en reservorios de areniscas

Son varios los posibles beneficios de la determinación de las propiedades mineralógicas y del reconocimiento de los distintos modelos litológicos que componen los materiales intersticiales finos y los clastos de los reservorios arenosos. Citaremos los dos principales.

➤ **Estudios petrofísicos:**

La determinación mineralógica de los intervalos sedimentarios puede estar orientada a la interpretación de la evolución geohistórica secuencial, lo cual es interesante desde la mirada preponderantemente científica. Tal el caso de la Fm. Springhill en la cuenca Austral, cuya relación Th/K es mayor en las areniscas del miembro continental y menor en las areniscas glauconíticas de origen marino que suprayacen a las primeras, como puede verse aquí en el perfilaje y gráfico cartesiano, que también involucran el factor fotoeléctrico (PEF).



Además este conocimiento del ambiente de depositación puede ser muy útil para la definición de geometrías estratigráficas y por lo tanto contribuir al cálculo del volumen de reservorio interesado por uno o varios pozos y consecuentemente al cálculo de reservas hidrocarburíferas probables y posibles.

Algún paleontólogo podría también pensar en sacar conclusiones sobre la dificultad para caminar o correr que saurisquios y ornitisquios habrán tenido sobre barros arcillosos de composición particularmente pegajosa...

➤ **Diseños de sistemas de estimulación con ácidos:**

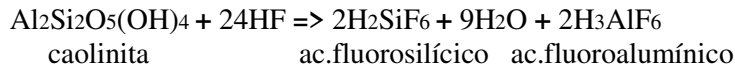
A partir de la interpretación de los tipos de arcillas en los reservorios es posible establecer la metodología de trabajo más apropiada a emplear en operaciones de estimulación ácida cuyo objetivo sea la remoción de esas partículas arcillosas que obturan las gargantas porales, lo que en estos casos constituye un daño de formación de origen natural. (Sabemos que también puede haber un daño de formación durante la perforación si se tiene una columna de lodo cuya excesiva densidad provoca una obturación poral debida a determinados aditivos que ingresan al reservorio mediante el proceso de invasión, en cuyo caso hablaremos de petrofísica forense...)

Una vez determinados los componentes de la roca, es posible establecer un criterio que permita optar por un sistema de estimulación que no perjudique todavía más la calidad del reservorio, previendo de antemano el comportamiento y la respuesta de los modelos frente a una estimulación ácida. De lo que se trata, en síntesis, es conseguir un remedio efectivo, que no sea peor que la enfermedad.

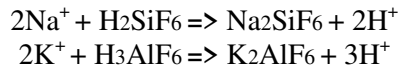
Generalmente los sistemas de estimulación de este tipo están compuestos por combinaciones de HCl-FH.

- En reservorios **con alto contenido de caolinita** para poder utilizar HCl-FH sería importante también emplear agentes quelantes y secuestrantes de Fe, como EDTA (ácido etilendiaminotetraacético), ácido cítrico o acético.

La presencia de caolinita permite inferir migración de componentes finos, siendo ésta la principal responsable de estos procesos migratorios. Para su eliminación se utiliza ácido HF, el cual disuelve la caolinita y genera ácido fluorosilícico, como se expresa seguidamente:



Se debe tener cuidado con subproductos como el fluorosilicato de sodio o potasio, ya que el ácido fluorosilícico sigue reaccionando con otros minerales presentes en la roca o con los cationes del agua de inyección:



No se aconseja la utilización de ClNa en conjunción con el lodo ácido o *acid mud* (HCl-HF) debido a que produce precipitados gelatinosos insolubles. Asimismo se recomienda para la estimulación la utilización de estabilizadores de arcilla en base a cationes multivalentes como aluminio o circonio.

- En reservorios **con mucha presencia de clorita** igualmente la estimulación ácida (CIH) tiende a disolverla y el hierro liberado reprecipita como compuestos secundarios de hierro: $\text{Fe}(\text{OH})_3$ que obtura los canales porales.

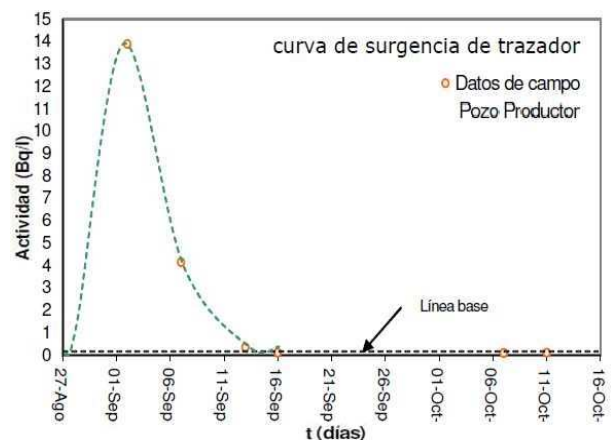
- En reservorios **cuya matriz es principalmente del grupo de las esmectitas** (como la montmorillonita) se produce un intercambio catiónico, por ejemplo con aguas de inyección (tanto más cuanto más dulces sean), pudiendo llegar a expandirse y reducir considerablemente el volumen poral.

En caso de inyección de agua para recuperación secundaria se recomienda el monitoreo continuo mediante estudios de compatibilidad dados los inconvenientes que ocasionaría la dilución de agua de inyección debido a mezclas con aguas de distinta salinidad.

- En reservorios **con presencia de importantes cantidades de illita**, la cual posee propiedades migratorias, generalmente se ocasionan aumentos de la tortuosidad y obturamientos de gargantas porales.

TRAZADORES RADIATIVOS ENTRE POZOS

Aunque no es un tema netamente geofísico (sino más bien geoquímico y de ingeniería petrolera), téngase presente que estos trazadores (así como otros no radiactivos, equivalentes a los de utilidad médica) son empleados para mapear el movimiento de fluidos entre pozos en proyectos de recuperación secundaria o terciaria –para lo cual también puede contribuir la sísmica 4D que se aborda en el Tema 18 pág.481–. En caso de recurrirse a un radioisótopo, ya sea natural o artificial, su detección puede realizarse con cualquier aparato lector de la radiación γ que éste emita. Con la esperanza de tener vías de flujo lo más eficaces posible para que el proyecto resulte financieramente saludable.



PRUEBAS DE TRAZADORES EN LA RECUPERACIÓN DE HIDROCARBUROS (modificado de Ramírez-Sabag, 2008)

CUESTIONARIO BÁSICO

- ¿Por qué motivo deben tomarse recaudos de seguridad en radiometría de pozo?
- ¿Qué información da el perfil de rayos gamma totales y cuándo se los utiliza?
- Describir los datos aportados por el perfil espectrométrico de pozo y sus aplicaciones.
- ¿Qué tipos de perfiles de densidad existen y qué datos proveen?
- ¿Cuáles perfiles neutrónicos pueden correrse en pozos petroleros, qué emiten y reciben, y qué información ofrece cada uno?
- Comentar la utilidad del perfilaje sinérgico.
- ¿Cuáles son los perfiles que pueden correrse a pozo entubado?
- ¿Cómo son tipificadas las arcillas mediante los diagramas de Th/K, y qué limitaciones puede haber?
- Comentar las aplicaciones prácticas en pozos de la determinación de las arcillas atravesadas.
- ¿Qué utilidad tienen los trazadores de pozo?

BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- Acosta, N., Estrada, E. & Saavedra, B., 2007. Porosity variations by diagenesis of the Bajo Barreal Formation, San Jorge Basin; methodology of evaluation with logs . S.P.E.X. Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference (8 p).
- Cantos Figuerola, J., 1972. Tratado de geofísica aplicada (p 484-485). Librería de Ciencia e Industria.
- De Beer, F. & Ameglio, L., 2011. Neutron, X-ray and dual gamma-ray radiography and tomography of geomaterial; a South African perspective. The Leading Edge, V.30, N°6 (p 666-672).
- Ellis, D. & Singer, J., 2007. Well logging for Earth scientists (p 247-414). Springer.
- Ferrari, A., 2011. Stelle, galassie e Universo, fondamenti di astrofisica (560 p). Springer-Verlag.
- Freedman, R., Herron, S., Anand, V., Herron, M., May, D. & Rose, D., 2014. New method for determining mineralogy and matrix properties from elemental chemistry measured by gamma ray spectroscopy logging tools. S.P.E. Annual Technical Conference and Exhibition, Proceedings 3 (16 p).
- Gadallah, M., El-Terb, R., El-Kattan, E. & El-Alfy, I., 2010. Spectrometry and reservoir characteristics of Rudeis Formation in Belayim marine oil field, Gulf of Suez, Egypt. Earth Science, V.21 N°1 (p 171-199).
- Gearhart Industries, 1984. Well service systems (varios capítulos, 129 p).
- Griffiths D. & King, R., 1972. Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos (p 219-220). Editorial Paraninfo.
- Jaramillo, O., Romero, R., Ortega, A., Milne, A., & Lastre, M., 2010. Matrix acid systems for formations with high clay content. SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control (12 p).
- Lunine, J., 1999. Evolution of a habitable world (p 17-22, 35-44). Cambridge University Press.
- Menghini, M., 1989. Compaction monitoring in the Ekofisk Area Chalk Fields. Journal of Petroleum Technology, V.41 N° 7 (p 735-739).
- Pemper, R., Gold, R. & Nagel, N., 1998. Monitoring formation compaction. In Depth, V.4 N°2 (p 24-33).
- Ramírez-Sabag, J., Valdiviezo-Mijangos, O. & Coronado, M., 2005. Inter-well tracer tests in oil reservoirs using different optimization methods: a field case. Geofísica Internacional, V.44, N°1 (p 113-120).
- Schlumberger, 1972. Fundamentos de interpretación de perfiles (p 57-94).
- Schlumberger, 1979. Log interpretation charts (98 p).
- Sheriff, R., 1991. Encyclopedic dictionary of exploration geophysics (376 p). Society of Exploration Geophysicists.
- Schlumberger, 1987. Evaluación de formaciones en la Argentina (cap. III, p 1-40).
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. & Keys, D., 1976. Applied geophysics (p 789-797). Cambridge University Press.
- Tengattini, A., Lenoir, N., Andò, E & Viggiani, G., 2021. Neutron imaging for geomechanics: a review. Geomechanics and Energy for the Environment, N°27 (19 p).
- Welex, 1984. Introducción al perfilaje (varios capítulos, 294 p).
- Western Atlas, 1994. Introducción al perfilaje de pozos (cap. 7, 8 y 11; 175 p).

Los posibles errores y sesgos contenidos en estas Glosas de Geofísica son sólo atribuibles al primero de los autores.