
Técnicas Nucleares en la Prospección y Explotación de Petróleo

M. Balcázar, A. López, J. P. Castellanos
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
Apartado Postal 18-1027, México, D.F., 11801
mbg@nuclear.inin.mx; alopez@nuclear.inin.mx; jpcm18@yahoo.com.mx.

Resumen

La Apatita es un mineral que se encuentra en los núcleos de perforación de exploración petrolera, cuyo contenido natural de Uranio es de alrededor de 10 ppm. Este uranio se fisiona espontáneamente produciendo trazas de fisión cuyo número es proporcional a la edad de la Apatita y cuyas longitudes permanecieron estables a temperaturas menores de 60 °C, se redujeron parcialmente en el rango de temperaturas de 60 °C a 120 °C y se borraron totalmente si el núcleo de perforación estuvo a temperaturas mayores de 120 °C [1].

Esta concordancia en la llamada “ventana térmica de formación” del petróleo entre 60 °C y 120 °C y el borrado parcial de las longitudes de trazas de fisión en la Apatita, permite usar ésta para determinar no solo la edad del campo petrolero, pero también su historia térmica geológica (paleo temperatura), permite además modelar la formación del campo petrolero y contribuir a plantear a PEMEX estrategias de explotación y exploración [2].

En este trabajo se presenta: La visualización de las trazas de fisión en la Apatita de Cerro de Mercado, Durango, considerada como un estándar internacional de fechado; los principios básicos de esta técnica nuclear que permiten determinar la edad de la Apatita; la formación de trazas de fisión horizontales dentro de la Apatita, por irradiación con fragmentos de fisión; y cómo el análisis de la inestabilidad térmica de las longitudes de las trazas de fisión proporciona información de la paleo temperatura de la cuenca petrolera.

1. INTRODUCCIÓN

El petróleo se originó de materia orgánica sepultada en sedimentos libres de oxígeno. Se encuentra en forma de crudo, gas natural y asfalto.

La generación de petróleo comenzó con la formación de materia orgánica en kerogeno, posteriormente se formó el crudo al incrementarse la presión y la temperatura; un incremento adicional de la temperatura produjo un rompimiento de moléculas dando origen a la formación de gas natural.

La madurez del kerogeno dependió de su origen, ya sea alga marina, de vegetales terrestres o mezcla de organismos marinos, siendo esta última la principal fuente de crudo.

El factor más importante en la generación de petróleo, es la temperatura, la cual depende del gradiente geotérmico de la cuenca sedimentaria. Un factor adicional es el tiempo, de tal forma que la combinación de ambos factores define una “ventana” de generación. Una cuenca a 50°C necesitó alrededor de 100 millones de años para la generación de petróleo, mientras que una cuenca joven de 10 millones de años necesitó temperaturas del orden de 150°C. Bajas temperaturas de cuencas jóvenes o altas temperaturas de cuencas viejas, no generaron petróleo o lo transformaron en gas respectivamente.

El propósito de este trabajo es establecer los alcances y limitaciones de la técnica nuclear de fechado y paleo temperatura para realizar modelos de formación de cuencas petroleras.

2. VISUALIZACIÓN DE TRAZAS DE FISIÓN EN APATITA DE DURANGO

La Apatita es un mineral cristalino de forma hexagonal de composición compleja, formado principalmente por clorofosfato de calcio o fluorofosfato de calcio. Se halla en numerosos tipos de yacimientos: pegmatitas, gangas de los yacimientos de wolframio y estaño, de hierro y en rocas volcánicas. También forma rocas del tipo de las calizas, los conocidos fosfatos.

Durante la formación de la Apatita, este mineral atrapó átomos de uranio en su red cristalina, en concentraciones ligeramente mayores a 10 ppm. La fisión espontánea de un núcleo de uranio produce dos núcleos ionizados de masas similares que viajan en direcciones opuestas a velocidades iniciales del orden de 1/10 de la velocidad de la luz.

Los fragmentos de fisión pierden rápidamente su velocidad al interactuar coulombianamente, en los átomos de la red cristalina de la Apatita, ionizándolos. Los iones positivos creados a lo largo de la trayectoria de los fragmentos de fisión, se rechazan coulombianamente produciendo defectos y desarreglos en la red cristalina del mineral, dejando una región dañada, denominada traza latente, de aproximadamente 16.3 micras de longitud y de 15 a 40 Å de diámetro.

La Apatita del Cerro de Mercado, Durango es considerada un estándar internacional con una edad de 31.4 ± 0.6 millones de años. Esta Apatita proviene de la mina de hierro “a cielo abierto” más importante del país, cuya formación geológica se dio en un solo evento eruptivo sin variación posterior en el tiempo [4].

La observación de la estructura latente de la traza de fisión, usando microscopía de transmisión, muestra que está formada por defectos puntuales y defectos extendidos a lo largo su trayectoria. La Figura 1a) muestra un cristal de Apatita de Durango pulido, donde las trazas latentes se han hecho ópticamente visibles en un analizador de imágenes, al sumergir previamente la Apatita en ácido nítrico (HNO_3 5.5N durante 40s. a

20°C), lo que implica que los defectos tienen una menor energía de activación, que el resto del material dañado. La Figura 1b) es un acercamiento de la parte a)

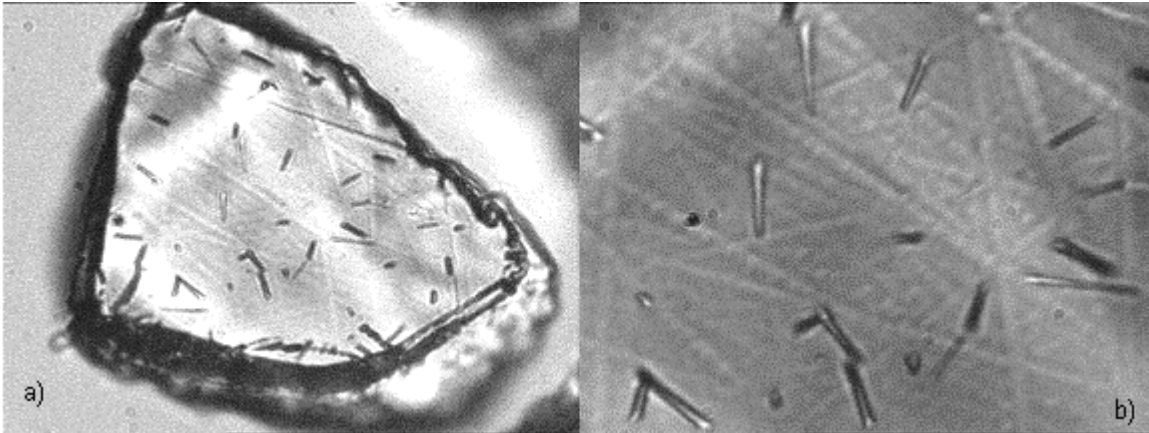


Figura 1. a) Corte pulido de un mineral de Apatita de Durango después de haber sido sumergido en HNO₃ 5.5N durante 40s. a 20°C. b) Trazas individuales de fisión espontánea.

Las trazas latentes pueden ser borradas por calentamiento, indicando que la energía de activación es de unos cuantos electrón volts, el mecanismo de reparación de la región dañada es por difusión de átomos.

La densidad de defectos a lo largo de la traza latente, es proporcional a la energía depositada por los fragmentos de fisión. La pérdida de energía por unidad de longitud del fragmento de fisión es máxima en su origen, disminuyendo conforme pierde velocidad hasta alcanzar su longitud total; entonces, aunque la reparación del daño por temperatura ocurre en toda la traza latente, sus extremos son más susceptibles al borrado térmico debido a menor densidad de defectos [5].

El análisis de trazas de fisión en un mineral llamado Apatita, proporciona información sobre variaciones de temperatura en la escala geológica, de interés en la generación de campos petroleros. Una aproximación de la historia térmica en un campo petrolero se obtiene usando algunos indicadores como el grado de madurez orgánica, gradientes geotérmicos y reflectancia vítrea. Sin embargo la ventaja única del análisis de trazas de fisión en Apatita es proporcionar no-solo máximas temperaturas sino su variación en el tiempo (paleo temperatura) [6].

La Figura 2a muestra una relación entre la variación de la máxima temperatura con la profundidad de la cuenca y cómo influencia ésta, la madurez de los hidrocarburos. La probabilidad de madurez del crudo es mayor en el rango de temperaturas de 60-130°C.

La Figura 2b muestra un mineral de Apatita extraída del Cerro del Mercado, Durango, la cual es usada como estándar internacional de fechado.

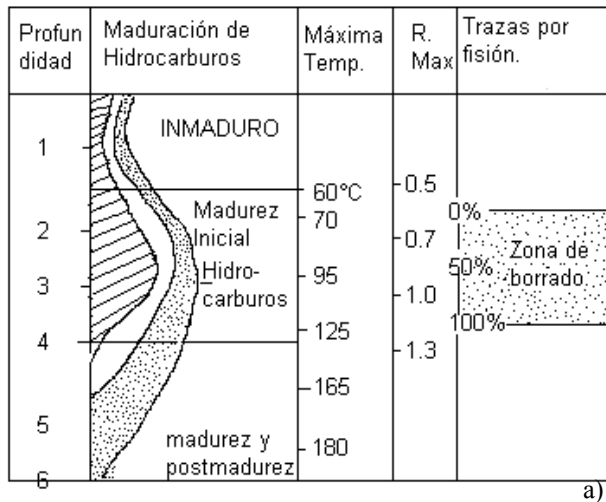


Figura 2. a) Relación entre la zona de borrado en Apatita con la madurez de hidrocarburos. b) Minerales de Apatita del Cerro de Mercado, Durango.

Dentro de ese rango se encuentra la estabilidad térmica de las trazas de fisión en Apatita, es decir, el 100% de las trazas desaparecen del cristal de Apatita cuando éste ha sido sometido a temperaturas cercanas a los 130 °C; 0% de borrado de trazas en el cristal se obtienen a temperaturas inferiores de 70 °C [6].

3. DETERMINACIÓN DE LA EDAD POR TRAZAS DE FISIÓN EN APATITA

Cuando se forma un mineral o un vidrio volcánico, estos atrapan átomos de uranio presentes en la naturaleza, parte de los cuales, decaen a otros átomos D mediante emisión espontánea de radiación, siguiendo la ley de decaimiento bien conocida.

$${}^{238}N = {}^{238}N_0 e^{-\lambda_d t} \tag{1}$$

Donde:

${}^{238}N_0$ = número de átomos de uranio atrapados en la muestra cuando ésta se formó en la naturaleza.

${}^{238}N$ = Número de átomos de uranio remanentes en la muestra, después de un tiempo t.

λ_d = constante de decaimiento del ${}^{238}U$.

se cumple que el número de átomos de ${}^{238}U$ al formarse el cristal ${}^{238}N_0$ es igual al número de átomos de ${}^{238}U$ en cualquier tiempo ${}^{238}N$ más el número de átomos de ${}^{238}U$ que han decaído ${}^{238}N_d$.

$${}^{238}N_0 = {}^{238}N + {}^{238}N_d \quad (2)$$

Despejando ${}^{238}N_d$ y sustituyendo ${}^{238}N_0$ de (1):

$${}^{238}N_d = {}^{238}N_0 - {}^{238}N = {}^{238}N(e^{\lambda_d t} - 1) \quad (3)$$

$${}^{238}N_d = {}^{238}N(e^{\lambda_d t} - 1) \quad (4)$$

parte del uranio, atrapado en la muestra, se fisiona espontáneamente siguiendo la ley de decaimiento radioactivo. Cada fisión de uranio, produce dos átomos ionizados, que viajan a grandes velocidades en sentido opuesto uno del otro, ocasionando un daño de aproximadamente 16 micras de longitud, dentro de la estructura del material. Este daño o traza latente puede ser agrandada por soluciones químicas hasta ser una traza de fragmento de fisión espontánea visible en un analizador de imágenes [7].

Así que el número de átomos de uranio que decae por fisión espontánea ${}^{238}N_e$ está dado por

$${}^{238}N_e = \frac{\lambda_f}{\lambda_d} {}^{238}N(e^{\lambda_d t} - 1) \quad (5)$$

El uranio esta compuesto principalmente por los isótopos ${}^{238}\text{U}$ (92.27%), ${}^{235}\text{U}$ (0.72%) y ${}^{234}\text{U}$ (0.005%). Así que el ${}^{238}\text{U}$ es el isótopo más importante en este método. El ${}^{238}\text{U}$ tiene dos formas de decaimiento, por emisión α ($\lambda_\alpha = 1.537 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$) y por fisión espontánea ($\lambda_f = 8.46 \times 10^{-17} \text{ a}^{-1}$). Nótese que por cada decaimiento por fisión, existen 2×10^7 decaimientos α .

Así que la constante de decaimiento $\lambda_d = \lambda_\alpha + \lambda_f \approx \lambda_\alpha$

Entonces (5) se convierte en

$${}^{238}N_e = \frac{\lambda_f}{\lambda_\alpha} {}^{238}N(e^{\lambda_\alpha t} - 1) \quad (6)$$

El número ${}^{238}N$ de átomos de ${}^{238}\text{U}$ remanentes en la muestra, se mide indirectamente por irradiación neutrónica, de una segunda porción de la muestra, en el reactor Triga Mark III. Esta segunda porción es sometida a un tratamiento térmico previo, para borrar las trazas latentes de fisión espontáneas.

La irradiación del mineral con un flujo Φ de neutrones, produce fisión tanto en el ${}^{235}\text{U}$ como en el ${}^{238}\text{U}$, de acuerdo a la expresión $N_i \sigma \Phi$, donde N_i es el número de fisiones de ambos isótopos del uranio por unidad de volumen y σ la sección transversal de fisión

$$N_i = ({}^{235}N \sigma + {}^{238}N \sigma) \phi \quad (7)$$

La sección de fisión del ${}^{238}\text{U}$ tiene un umbral a una energía para neutrones rápidos de 1 Mev; en el intervalo de 2 a 8 Mev es de 5.8 barns mucho menor que la sección de fisión del ${}^{235}\text{U}$ para neutrones térmicos (570.8 barns).

Entonces para un espectro de neutrones con una componente térmica dominante se tiene

$$N_i \approx {}^{235}N\sigma\phi \quad (8)$$

como la razón de concentración $I = \frac{{}^{235}N}{{}^{238}N}$ es conocida, entonces

$$N_i = {}^{238}NI {}^{235}\sigma\phi \quad (10)$$

Entonces el número de átomos de ${}^{238}\text{U}$ presentes en la muestra está dado por:

$${}^{238}N = \frac{N_i}{I {}^{238}\sigma\phi} \quad (11)$$

sustituyendo (11) en (6) tenemos

$${}^{238}N_e = \frac{\lambda_f}{\lambda_\alpha} \frac{N_i (e^{\lambda_\alpha t} - 1)}{I {}^{235}\sigma\phi} \quad (12)$$

Tanto la sección eficaz de fisión del ${}^{235}\text{U}$ como la fluencia de neutrones, son dependientes de la energía E, simplificando ${}^{238}N_e = N_e$ y ${}^{235}\sigma = \sigma$

$$\frac{N_e}{N_i} = \frac{\lambda_f}{\lambda_\alpha} \frac{I(e^{\lambda_\alpha t} - 1)}{\int \phi(E)\sigma(E)dE} \quad (13)$$

Entonces la edad del mineral es:

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left[\frac{\lambda_\alpha}{\lambda_f} \left(\frac{N_e}{N_i} \right) I \int \phi(E)\sigma(E)dE + 1 \right] \quad (14)$$

Esta ecuación de la edad requiere determinar el espectro del flujo neutrónico del reactor.

N_e y N_i en la ecuación (14) son el número de trazas espontáneas e inducidas por unidad de volumen. La medición de ellas se realiza sobre una superficie pulida del mineral. Entonces para determinar la relación entre las densidades de trazas espontáneas ρ_e e inducidas ρ_i por unidad de área con aquellas por unidad de volumen se hacen las siguientes consideraciones:

- Todas las fisiones tienen el mismo alcance R independiente de su orientación en los planos cristalinos del mineral.
- Todas las fisiones ocurren isotrópicamente en el cristal.

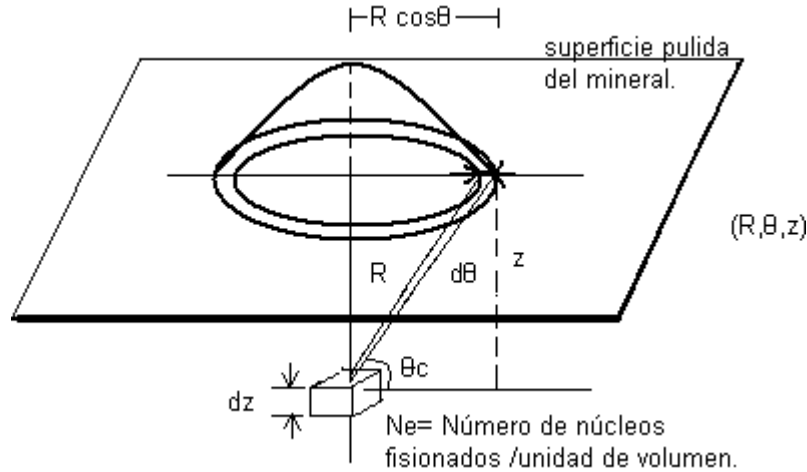


Figura 3. Eficiencia de detección de trazas de fisión en Apatita.

En una geometría 2π la probabilidad P de encontrar fragmentos de fisión en un anillo diferencial es $2\pi R \cos\theta R d\theta$ es

$$P = \frac{2\pi R \cos\theta R d\theta}{4\pi R^2} = \frac{1}{2} \cos\theta d\theta \quad (15)$$

$$P(\theta) = \frac{1}{2} \int_0^{\pi/2} \cos\theta d\theta = \frac{1}{2} \text{sen}\theta \Big|_0^{\pi/2} = \frac{1}{2} (\text{sen}(\pi/2) - \text{sen}0) = \frac{1}{2} (1 - \text{sen}0) \quad (16)$$

$N_e dz$ = número de núcleos fisionados por unidad de área dentro de un elemento diferencial dz .

Entonces, el número de trazas de fisión por unidad de área ρ que interceptan la superficie pulida del mineral es

$$\rho = \int_0^R (1 - \text{sen}\theta) N_f dz = N_e \int_0^R (1 - \frac{z}{R}) dz = N_e \left[z \Big|_0^R - \frac{z^2}{2R} \Big|_0^R \right] = N_e \left[R - \frac{R^2}{2R} \right] = \frac{N_e R}{2} \quad (17)$$

Por lo tanto la densidad de trazas espontáneas por unidad de área ρ es

$$\rho = \frac{N_e R}{2} \quad (18)$$

ó

$$\rho_e = g N_e R \quad (19)$$

donde el factor geotérmico g es $\frac{1}{2}$ para una superficie externa o 1 para una superficie interna.

Análogamente la densidad de trazas inducidas ρ_i por unidad de área es

$$\rho_i = gN_iR \quad (20)$$

donde el alcance R para fisión espontánea e inducida es el mismo en el mineral. Entonces la ecuación (14) se convierte en

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left[\frac{\lambda_\alpha}{\lambda_f} \left(\frac{\rho_e}{\rho_i} \right) I \int \phi(E) \sigma(E) dE + 1 \right] \quad (21)$$

A partir de la ecuación (21) se puede seguir dos estrategias:

La determinación del espectro de neutrones para evaluar la integral o utilizar un estándar de edad del mismo mineral. En el caso de la Apatita el estándar es de Cerro de Mercado, Durango [8], con una edad de $t_s = 31.4 \pm 0.6$ millones de años. Entonces poniendo t_s en la ecuación (21) y dividiendo ambas expresiones se tiene: que la edad de una muestra de Apatita en un campo petrolero está dada por

$$t = \frac{\left(\frac{\rho_e}{\rho_i} \right)}{\left(\frac{\rho_e}{\rho_i} \right)_s} \quad (22)$$

4. INESTABILIDAD DE TRAZAS DE FISIÓN EN APATITA Y LA FORMACIÓN DEL PETRÓLEO.

Se ha observado experimentalmente, que el borrado de trazas por calentamiento es una doble función del tiempo y la temperatura y obedece a una ecuación de Arrhenius. Las líneas negras en la Figura 4 muestran las regiones de borrado de trazas del 100%, 50%, 0% como función de la temperatura y del tiempo. Los puntos en la parte inferior corresponden a borrado térmico en laboratorio; los puntos en la parte superior, se obtuvieron [5] analizando el borrado en muestras de Apatita, obtenidas a diferentes profundidades de un núcleo de perforación, nótese que para la región de borrado geológico, el factor de tiempo es menos significativo que el de temperatura, ya que un cambio en la duración del calentamiento de uno a cien millones de años, está en el intervalo de temperatura cercano a los 25°C.

La Figura 4b muestra la variación de la longitud de trazas horizontales, cuando las Apatita han sido sometidas a un tratamiento térmico en el laboratorio en una mufla, de 250°C, 300°C y 340°C durante una hora, previo al revelado químico. La desviación estándar $s=0.7$ para la Apatita sin borrado, es indicativa de la doble joroba típica que presenta la distribución de masas en la fisión de uranio. Con el incremento de temperatura, las distribuciones se corren hacia la izquierda. El ensanchamiento es debido al carácter estadístico del borrado de los defectos en el cristal [8].

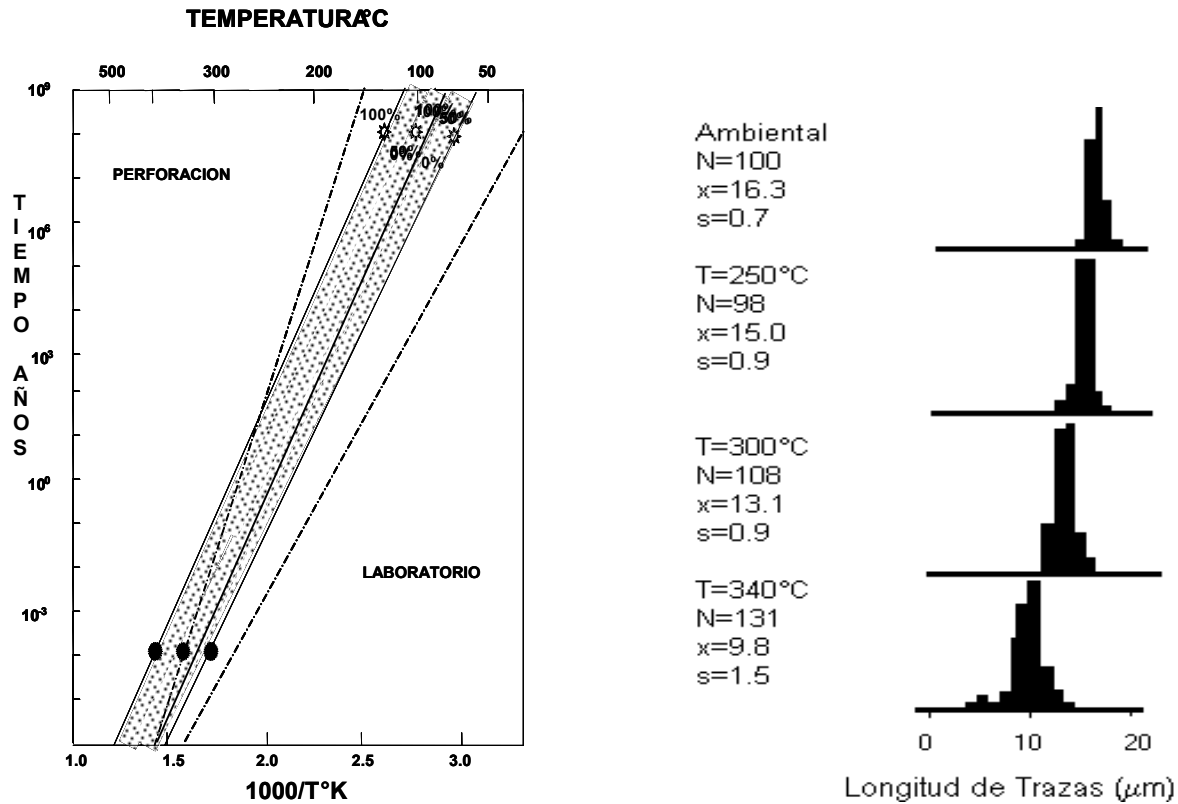


Figura 4- a) Porcentaje de borrado de trazas de fisión en Apatita. b) Histogramas de distribución en Apatita a diferentes temperaturas.

El uranio se encuentra distribuido al azar en la Apatita, así que las trazas latentes de fisión se localizan en todo el volumen del cristal.

La Figura 5a muestra que el ácido nítrico no solo magnifica las trazas latentes que cruzan la superficie del detector, sino también aquellas internas que son alcanzadas por el ácido a través de fracturas (Tracks-IN-CLEavage) o trazas (Tracks-IN-Track). La medida de las trazas horizontales internas proporciona el tamaño del alcance total de los fragmentos de fisión en el cristal.

El número de estas trazas horizontales internas se incrementó irradiando la Apatita en una cámara al vacío con un haz de fragmentos de fisión a 90° con respecto a la superficie. La Figura 5b muestra una de las trazas horizontales reveladas con este método, cuyo medida se realiza con un analizador de Imágenes.

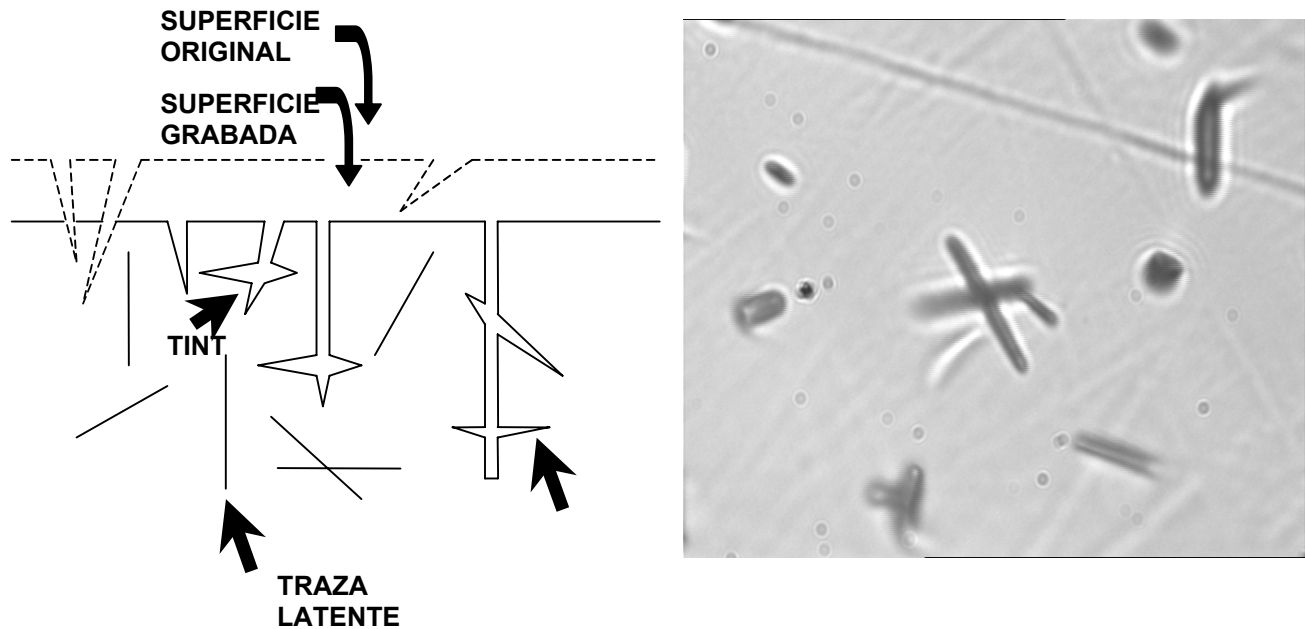


Figura 5. a) Formas más usuales de revelado de una traza. b) Traza horizontal interna revelada por Track in Track mediante irradiación con fragmentos de fisión.

El grado de borrado geotérmico de trazas de fisión en Apatita, genera cambios observables en la distribución de las longitudes de las trazas que produce una reducción aparente de la edad geológica obtenida.

La edad aparente de una Apatita sometida a un calentamiento geotérmico, se reduce debido al borrado parcial en sus trazas de fisión. La densidad superficial de trazas de fisión espontánea, es proporcional al tiempo o edad de la Apatita y proporcional a la concentración de uranio, así que determinando [6] esta última, es posible fechar la Apatita [7] [8]. Al reducirse la longitud de las trazas de fisión con la temperatura, existe una menor probabilidad de que las trazas crucen la superficie del mineral, reduciéndose la densidad de trazas y consecuentemente la edad.

El cambio en la forma de distribución de longitudes de trazas de fisión en cuencas petroleras, se ejemplifica en la Figura 6. Las distribuciones A, B y C corresponden a tres muestras hipotéticas de Apatita, que han sufrido un incremento paulatino de temperatura en el tiempo. A mayor rapidez de calentamiento geológico, se tiene una mayor rapidez de borrado térmico; esto hace que el promedio de las longitudes se desplace hacia valores menores y que las distribuciones se ensanchen.

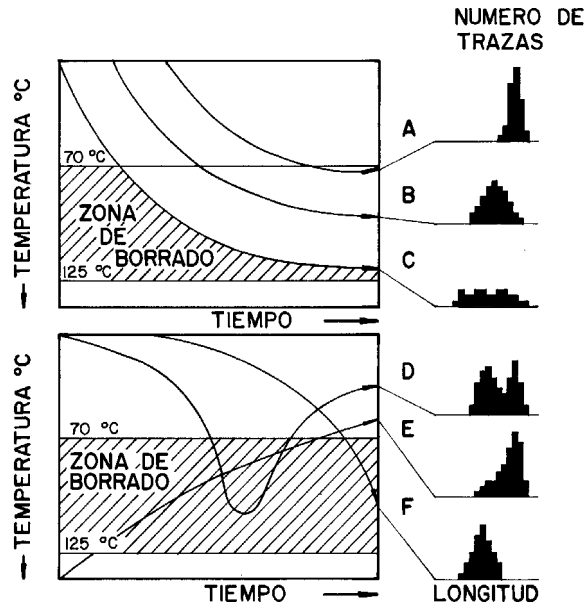


Figura 6. El borrado térmico parcial de trazas de fisión en Apatita proporciona histogramas de longitudes cuyo análisis permite modelar la historia térmica.

La distribución F corresponde a un calentamiento súbito reciente en el tiempo, la media de la longitud de trazas y su desviación estándar es cercana a los valores obtenidos en un borrado térmico efectuado en el laboratorio. La asimetría de la distribución E corresponde a un enfriamiento paulatino. Las pocas trazas de fisión de corta longitud en la distribución, son el resultado del borrado parcial ocurrido antes que la Apatita alcanzara su baja temperatura actual. El doble pico de la distribución D es indicativo de un pulso térmico; el pico de menor longitud corresponde al borrado parcial de trazas durante el pulso, mientras que el pico de mayor longitud fue formado por la fisión espontánea del uranio después del pulso térmico [7].

5. CONCLUSIONES

Las condiciones de validez de las ecuaciones de la edad son:

Las trazas naturales contadas deben ser sólo trazas provenientes de la fisión espontánea del uranio. Si la componente rápida del espectro de neutrones es dominante, entonces se requiere conocer la concentración de Torio en la muestra para en su caso modificar las ecuaciones y considerar esta concentración.

El uso del estándar de edad Apatita de Durango permite que el cociente (p_s/p_i) de las trazas espontáneas e inducidas cancele las eficiencias de detección de minerales diferentes. Las ecuaciones tienen que ser modificadas si se utiliza un estándar de vidrio con un contenido conocido de Uranio.

Debido a que la abundancia del ^{238}U , desde hace más de 10^9 años fue significativamente mayor que en el presente, la ecuación de la edad presentará un error mayor al 1% para minerales de edades mayores a 10^8 . Se debe en este caso realizar dichas modificaciones.

El estudio de las trazas de fisión en muestras de Apatita extraídas de pozos de perforación petrolera, proporciona información sobre la historia térmica del yacimiento. Los rangos de borrado térmico en la Apatita, corresponden a los rangos de temperatura y tiempo de mayor producción de hidrocarburos líquidos.

Los tres parámetros básicos, que son afectados por combinaciones de tiempo y temperatura en trazas de Apatita son: la edad, la forma del histograma de longitudes de trazas y el porcentaje de reducción de trazas de fisión.

La realización de estos estudios requiere de un reactor nuclear para el fechado de Apatita; recursos humanos integrando un binomio de especialidades petrolera-nuclear, capaz de relacionar el carácter estadístico de los procesos de fisión nuclear espontánea en Apatita, con las variaciones geotérmicas de campos petroleros.

REFERENCIAS

1. M. Balcázar, U.A. Glasmacher, S. Díaz, A. López, G.A. Wagner, "Particle-track dating a tool to define age of mineral deposits". *Memorias de la XXIV Convención Internacional de la Asociación de Ingenieros de Mina Metalurgistas y Geólogos de México* ISBN 968-7726-01-6, p 33-35, 17-20 de Octubre de 2001, Acapulco, México. Editor AIMMGM.L. Gutiérrez, A.
2. A.J.W. Gleadow, I.R. Duddy and J.F.Lorering, "Fission track analysis: A new tool for the evaluation of thermal histories and hydrocarbon potential", *Australian Petroleum Exploration Association Journal*, **Vol. 23** p. 93-102, (1983)
3. A. López, M. Balcázar, F. Aguilar, U.A. Glasmacher, G.A. Wagner, "Neutron-Irradiation Calibration Facility for Fission Track and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating in México", *European Journal of Mineralogy*, **Vol. 12** p. 116 (2000).
4. U.A. Glasmacher, M. Balcázar, G.A. Wagner, V.N. Grabczewski and R. Neumann, "HR-TEM visualization of alpha-recoil-tracks (ART) in dark mica and chemical composition of track matter", *European Journal of Mineralogy*, **Vol. 12**, p. 61, (2000).
5. U.A. Glasmacher, A. López, A. Tremblay, M. Zentilli, G.A. Wagner, M. Balcázar, "Cretaceous to Tertiary tectono-thermal evolution of Laurentian margin in Quebec, Canada", *Geotemas* **Vol. 4** p. 83-87 (2002).
6. M. Balcázar, A. López, A. Hernández, R. Corona, U. A. Glasmacher, G. A. Wagner, Characterization of Durango Apatite, *Radiat. Meas.* To be published
7. L. Gutiérrez, A. López and M. Balcázar, "Applications of dating for searching geothermic sources ", *Nuclear Tracks and Radiation Measurements* **Vol. 8** p. 617 (1984).

8. M. Balcázar and A. López, "Fission Track Dating of Minerals", *Small Research Reactor Workshop*, 13-14 January, 2003 Kingston, Jamaica.