

ESTABLECIMIENTO DE LA EDAD DEL CRATER MONTURAQUI POR EL METODO DE TERMOLUMINICENCIA EN SOLIDOS

MIGUEL VERDUGO - CARLOS CARTES

Facultad de Física , Pontificia Universidad Católica de Chile

15 de Septiembre de 2000

El Cráter de Monturaqui ubicado en la Segunda Región de Antofagasta, es uno de los pocos cráteres de gran tamaño con que cuenta Chile. Este cráter tiene como dimensiones 460 metros de diámetro y 30 metros de profundidad, y una edad que hemos estimado en 590.000 años siguiendo un método basado en la termoluminiscencia de sólidos. Este fenómeno está basado en la captura de radiación por el sólido y que al calentarlo devuelve esa energía como luz visible, la gracia de esto es que mientras más tiempo se someta a la radiación más intensa será la luz emitida, pero también depende de la intensidad de la radiación, así como de otros factores. Entonces lo primero a determinar es la cantidad de radiación que recibe el material por año, la cual se divide en dos tipos, la externa: que es la que entrega el medio que es de $1,95 \cdot 10^{-3}$ grey por año y la interna que la proveniente de las mismas rocas del meteorito que es de $1,37 \cdot 10^{-3}$ grey por año, sumando en total una dosis anual de $3,32 \cdot 10^{-3}$ grey por año. Ahora si se mide la Termoluminiscencia Natural (TLN) se obtiene la Paleodosis la cual es de 1968 grey, obteniendo por simple división la edad mencionada anteriormente. El material usado son cristales de cuarzo de alta pureza extraídos de las impactitas del meteorito los cuales tienen un tamaño inferior a 75 micrones. Para poder estimar la edad usamos varias muestras para obtener las curvas de termoluminiscencia natural (TLN), otras fueron irradiadas con una fuente beta a 1,2 grey por minuto durante un periodo de 6 horas para obtener la radiación equivalente y otras fueron irradiadas durante periodos más cortos para corroborar la proporcionalidad "tiempo-radiación observada" llamada supralinealidad., además medimos la radiación que entrega el terreno mediante unos dosímetros de cloruro de Calcio dejados en el terreno por un año, mismo método que aplicamos para medir la radiación entregada por las impactitas a los cristales dejándolos en contacto con estos dosímetros durante tres semanas.

keywords : termoluminiscencia - meteoritos - cráteres - radioactividad

I. Introducción

El cráter de Monturaqui esta ubicado en la Segunda Región de Antofagasta, Chile a $23^{\circ} 56'$ de latitud sur y a $68^{\circ} 17'$ de longitud oeste, en pleno desierto de Atacama.

En Julio de 1998 un grupo de estudiantes de Física, Astronomía y Geografía viajó a Monturaqui, con el objeto de obtener muestras de impactitas y establecer diferentes aspectos relacionados con este cráter, del cual nosotros nos hemos encargado de dar una primera aproximación a la edad del impacto.

Este grupo dejo en el lugar una serie de dosímetros de Cloruro de Calcio, para poder medir la radiación natural del lugar, y en una misión posterior a un año después los recuperó, estos dosímetros fueron dejados a 15 centímetros de profundidad aproximadamente y uno fue dejado en la superficie, es evidente que por efecto de los rayos cósmicos la medida de la radiación acumulada de este ultimo fue mayor. Nosotros suponemos como primera hipótesis, que no ha habido ningún cambio de importancia en la radiación ambiente ni algún evento que pudiera haber borrado la radiación acumulada por medio del calor (ej.: Erupción volcánica) desde que ocurrido el impacto, además hay pruebas geológicas que así lo corroboran; también las particulares condiciones climáticas de la zona han mantenido a este cráter en muy buen estado, que sin embargo de todas maneras da muestras de erosión, probablemente debido a los cambios climáticos ocurrido en la nuestro planeta desde entonces .

También nosotros ocupamos los dosímetros antes mencionados, para poder medir la radiación interna de las rocas del meteorito, la cual no tiene por que ser igual a la del entorno, y por lo tanto la suma de las dos, es la radiación total recibida por los cristales estudiados.

Teoría de la Termoluminiscencia

La termoluminiscencia es la emisión de luz desde un aislante o semiconductor cuando éste es calentado. Pero esto no debe confundirse con la luz emitida espontáneamente por una sustancia cuando ésta es calentada hasta la incandescencia. La termoluminiscencia es la emisión estimulada térmicamente de luz, luego de la previa absorción de energía proveniente de la radiación.

De ésta definición podemos encontrar los tres elementos necesarios para la producción de termoluminiscencia. Primero, el material debe ser un aislante o un semiconductor (los metales no muestran propiedades de emisión de luz). Segundo, el material debe haber estado absorbiendo energía durante una exposición a la radiación. Tercero, la emisión de luz debe ser provocada por el calentamiento del material. Además hay una importante propiedad de la termoluminiscencia la cuál no puede ser deducible de éstas condiciones, la cuál es particular a la termoluminiscencia, una vez calentado el material, para provocar la emisión de luz, éste no puede presentar termoluminiscencia por el simple hecho de enfriar el material y recalentarlo. De hecho para que el material muestre de nuevo termoluminiscencia, debe ser expuesto otra vez a la radiación, el aumento posterior de temperatura producirá nuevamente emisión de luz.

Los procesos fundamentales que gobiernan la producción de termoluminiscencia son esencialmente los mismos que gobiernan todos los procesos de emisión de luz.

En general la emisión de luz es explicada por la transferencia de energía desde la radiación hasta los electrones del sólido, excitando los electrones desde un estado fundamental **g** a un estado excitado **e** (ver figura 1). La emisión de un fotón tendrá lugar cuando un electrón regresa a su estado fundamental. Si tenemos ahora un nivel de energía metaestable **m** entre la diferencia de energía que existe entre **e** y **g**. Un electrón excitado desde **e** a **g** puede quedar atrapado en **m** y permanecer ahí hasta que le sea suministrada una cierta cantidad de energía **E** para retorna a **e** desde dónde podrá volver, cómo en una transición normal, a **g** con la consiguiente emisión de luz. Entonces observamos un retardo en la emisión de luz el cuál corresponde al tiempo que el electrón pierde en la trampa **m**. De argumentos termodinámicos podemos ver que el tiempo medio perdido por un electrón en una trampa a temperatura **T** está dado por:

$$\tau = \exp(E/kT)/s \quad (1)$$

Dónde **s** es una constante y **E** es la diferencia de energía entre **m** y **e** (llamada profundidad de la trampa), **k** esta la constante de Boltzmann. Entonces el proceso de emisión de luz es algo que depende, exponencialmente, de la temperatura.

Este simple cuadro de la emisión de luz, está basado en las bandas de energía de los sólidos. En la teoría se asume que una vez el electrón ha sido liberado de su trampa (transición **m-e**), la probabilidad de que éste retorne a **m** es mucho menor a la probabilidad de que éste retorne a **g**. La intensidad de la emisión de luz en cualquier instante **t** es proporcional a la tasa de recombinación (la tasa de transiciones **e-g**). En el caso de

transiciones e-g, están gobernadas simplemente por transiciones m-e y entonces la intensidad $I(t)$ es proporcional a la tasa de liberación de electrones desde la trampa, entonces:

$$I(t) = -C \frac{dn}{dt} = C \frac{n}{\tau} \quad (2)$$

dónde C es la constante de proporcionalidad y n es el número de electrones atrapados en m . Integrando (2) tenemos que:

$$I(t) = I_0 \exp(-t/\tau) \quad (3)$$

dónde τ está dado por la ecuación (1), t es el tiempo e I_0 es la intensidad en $t=0$. La ecuación (3) es una ecuación de decaimiento a temperatura constante una vez terminada la irradiación. Por lo tanto, a temperatura constante, el decaimiento es una simple exponencial (decaimiento a primer orden).

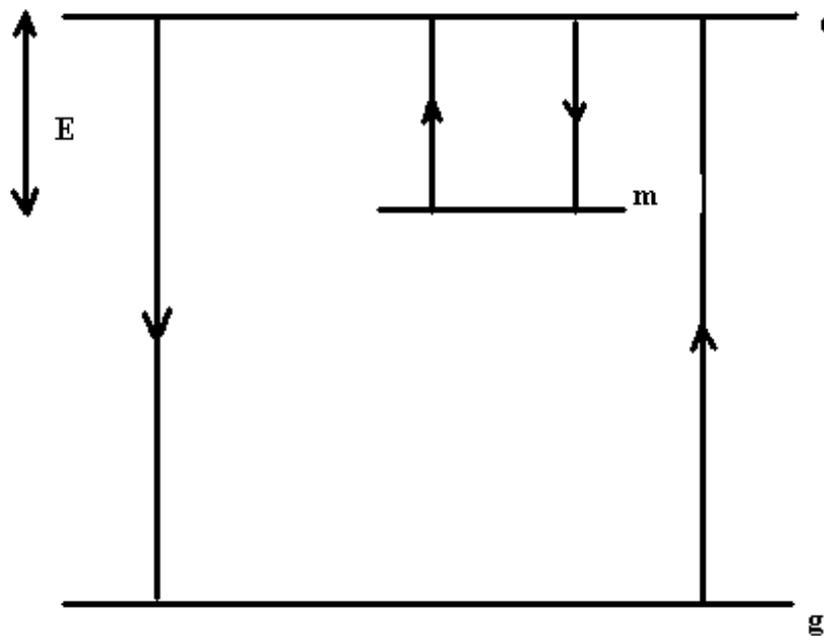


Figura 1

Es frecuente encontrar en la práctica, que el decaimiento no es exponencial. Una razón para esto es el traslape de varios procesos de primer orden, es decir a una misma temperatura tenemos varias trampas, cada una con un valores diferentes de E, son medidas. Una segunda razón es que una vez liberado de su trampa el electrón puede regresar a m, o recombinarse en g. En éste caso la tasa de recombinación no sólo es proporcional al número de electrones, también lo es al número de sitios de recombinación posibles. Suponiendo que éstos son iguales (ambos iguales a n) tenemos:

$$I(t) = -C \frac{dn}{dt} = \alpha n^2 \quad (4)$$

dónde α es constante a T constante.

Comparando la ecuación (4) con la ecuación (2) vemos que la intensidad de la emisión de luz es proporcional ahora a n^2 y antes lo era a n. La integración nos da:

$$I(t) = \frac{I_0}{(n_0 \alpha \cdot t + 1)^2} \quad (5)$$

La constante α está relacionada al tiempo de vida medio τ y el término que describe las posibilidades relativas de reentrampamiento de los electrones en m y su recombinación en g.

La ecuación (1) nos muestra que el término de vida media τ es dependiente exponencialmente de la temperatura. Entonces si la trampa es lo suficientemente profunda, tenemos que $E \gg kT_0$ (dónde T_0 es la temperatura ambiental) y entonces τ es muy grande. Esto significa que el electrón permanecerá atrapado en el nivel m indefinidamente ó que la tasa de electrones liberados $dn/dt = -n/\tau$ es muy pequeño a T_0 . Por ejemplo, para una trampa de profundidad $E = 1.5 \text{ eV}$ y asumiendo que $s = 10^{12} / \text{seg}$, luego $\tau = 7.3 \cdot 10^5 \text{ años}$ si $T = 298 \text{ K}$. Desde un punto de vista práctico esto significa que la emisión de luz nunca será observada desde ésta trampa a $T_0 = 298 \text{ K}$ o menos. Pero la emisión de luz puede ser inducida por un aumento de la temperatura. Por ejemplo, si la temperatura es aumentada a la velocidad lineal $\beta = dT/dt$, llegará a una temperatura a la cuál $I(t) = n/\tau$ es suficiente mente grande para que sea observable la emisión de luz. Así como T crece, τ decrece y en consecuencia la intensidad se incrementa a medida que los electrones se liberan de las trampas y toma lugar la recombinación. Eventualmente, como la trampa se vacía, $I(t)$ comienza a decrecer y resulta una curva de intensidad versus temperatura con forma de peak. Ya que la emisión de luz es estimulada por calentamiento esto es Termoluminiscencia. La forma normal de mostrar los datos de la termoluminiscencia es graficar la intensidad luminosa como función de la temperatura, conocida como **glow-curve** (curva fosforescente).

Montaje experimental y procedimiento

Cómo vimos en la teoría de la termoluminiscencia, necesitamos una fuente de calor para aumentar la temperatura de la muestra. Esto lo conseguimos utilizando una cámara especial, la cuál cuenta con un dispositivo capaz de introducirle gas nitrógeno puro, a una velocidad de 4 litros por minuto con lo cual evitamos la corrupción de los datos producida por la emisión de radiación a causa de la oxidación de la placa de acero dónde se ubica la muestra. El dispositivo para calentarla está fabricado de forma de proporcionar un aumento lineal de temperatura (en nuestro caso de $12^{\circ}\text{C}/\text{seg}$), el cual es monitoreado por una termocupla ubicada bajo la muestra.

Justo sobre la muestra a calentar, está ubicado un tubo fotomultiplicador, el cual mide la intensidad de la radiación emitida. éste enviaba una señal de corriente directa a un amplificador. El tubo es sensible a la radiación con longitudes de onda ubicadas en el ultravioleta (de hecho cuenta con un filtro para evitar que se cuenten señales que no nos interesen), además para asegurarnos de que la radiación de fondo sea lo más estable y uniforme posible, bajo la muestra hay una fuente de carbono 14 el cuál nos aseguraba una cierta constancia de la radiación de fondo.

Una vez que el fotomultiplicador nos envía la corriente, ésta es amplificada, luego pasa por un contador y por un plotter (graficador). En el contador integramos la señal proveniente del tubo fotomultiplicador (cómo estamos integrando la señal de corriente con respecto al tiempo el resultado es la medida de la cantidad de radiación emitida, con unidades de carga). El tiempo de medición es de 40 segundos, pero la señal es integrada entre los 330°C y 400°C que es justo el lapso de temperaturas dónde está ubicado el plateau y ahí es dónde están ubicadas las trampas que nos interesan, además si aumentamos mucho más la temperatura, comenzamos a obtener una corrupción de los datos debido a que la placa de acero se vuelve incandescente. El gráfico construido con el plotter va del rango de los 45°C hasta alrededor de los 450°C y con éste obtenemos la curva fosforescente descrita anteriormente.

Para calcular la radiación de fondo (llamada base) que parasita en la señal integrada, una vez calentada y medida la cantidad de radiación de cierta muestra, la dejamos enfriar y luego la calentamos y medimos de nuevo (pero ahora con las trampas vacías) con ello obtenemos la cantidad de radiación obtenida por la incandescencia de la muestra y por la incandescencia de la placa de acero. ésta radiación base es restada de la obtenida anteriormente y con ello obtenemos la radiación neta recibida por la muestra.

Ahora la curva de plateau necesitábamos irradiar previamente la muestra, lo cuál lo conseguimos con una fuente radiactiva de estroncio la cuál emite radiación beta con una intensidad de 1,2 Grey/minuto. Por ensayo y error nos dimos cuenta de que obtener una curva apreciablemente distinta entre la muestra irradiada y la natural necesitamos un tiempo de 6 horas de irradiación lo cuál es un fuerte indicativo de que la muestra es antigua. La fuente radiactiva en sí consiste en un trozo de estroncio, ubicado dentro de un cilindro de acero en cuyo extremo se ubican las muestras a irradiar.

La supralinealidad de las muestras a irradiar se medían irradiando una muestra a la que antes habían vaciado las trampas y luego la irradiábamos por un corto tiempo (algunos minutos), luego por métodos de termoluminiscencia medíamos la radiación absorbida y calculábamos la base para obtener la dosis neta recibida.

Por último para obtener la dosis entregada por el terreno y por los mismos restos del meteorito, utilizamos dosímetros que son pequeños cuadrados de teflón cubiertos con cristales de sulfato de calcio y dopados con disprosio. éstos fueron colocados en el sitio del cráter (enterrados a algunos centímetros del suelo) durante 1 año. También utilizamos el mismo tipo de dosímetros, colocándolos entre dos trozos del meteorito durante 26 días lo cuál nos dio la cantidad de radiación emitida por el meteorito en sí. La medición de la radiación absorbida por los dosímetros fue realizada con las mismas técnicas de termoluminiscencia descritas anteriormente.

El esquema de nuestro equipo para medir termoluminiscencia está dibujado a continuación:

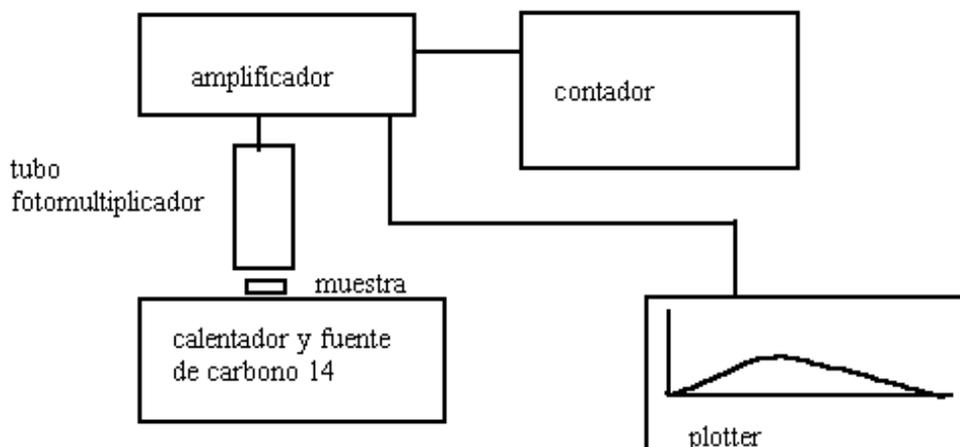


Figura 2

Fechaado por Termoluminiscencia

En su forma más simple, la ecuación para calcular la edad de un espécimen usando termoluminiscencia está dada por la ecuación:

$$Edad = \frac{TLN}{(\text{termoluminiscencia por unidad de dosis}) \cdot (\text{proporción de dosis natural})}$$

Dónde la termoluminiscencia natural (TLN) es la termoluminiscencia acumulada por el espécimen durante su existencia y la termoluminiscencia por unidad de dosis es la sensibilidad de aquel espécimen por exhibir termoluminiscencia después de habersele dado una dosis de radiación. Estrictamente hablando, la **edad** determinada es la cantidad de tiempo desde que el espécimen ha sido sometido a radiaciones, después de la última vez que fue calentado. La radiación se origina desde el terreno que rodea a la muestra, suponemos que no ha cambiado mucho a través del tiempo, y la última vez que fue calentado corresponde al instante en que el meteorito se estrelló con la tierra, su temperatura se elevó, ya sea por el calentamiento por el roce atmosférico o por el choque, y por consiguiente las trampas se vaciaron, aquí nuevamente suponemos que los restos del meteorito no fueron expuestos a temperaturas por sobre los 200°C después del choque. Por último la proporción de dosis natural es la cantidad de radiación que entrega el terreno dónde se encontró el espécimen por cantidad de tiempo, ésta radiación natural se debe principalmente a trazas de isótopos como uranio, torio y potasio, ésta dosis es estimada en la práctica, colocando dosímetros en la zona dónde se encontró el espécimen durante una cierta cantidad de tiempo conocida.

Un pre-requisito para el fechaado por termoluminiscencia normal es que no exista una pérdida significativa de electrones atrapados, durante el período de irradiación. En aplicaciones de fechaado, los períodos de irradiación suelen ser de muchos miles de años, por lo tanto tiempos de decaimiento cortos no son útiles. De ello se deduce que en el fechaado por termoluminiscencia se utiliza, por lo general la porción de alta temperatura de la curva de fosforescencia. Por lo tanto un espécimen que ha sido irradiado lentamente a temperatura ambiente durante un largo tiempo, no muestra termoluminiscencia a baja temperatura. Entonces seleccionando sólo los peaks que son suficientemente estables para resistir la pérdida térmica, podemos fechaar con cierta confianza. Ahora el problema es cómo las pérdidas del peak de alta temperatura pueden ser determinadas a pesar del largo tiempo transcurrido. La manera más simple de esto es usar el **test del plateau**. Dónde la curva de fosforescencia de termoluminiscencia natural (TLN) es comparada con la termoluminiscencia después de la irradiación artificial (TLN + β) y es graficada la curva (TLN)/(TLN + β) versus la temperatura. Aquellas trampas que no tienen la estabilidad requerida para una retención por largo tiempo están indicadas por valores variables del radio. La región de trampas estables está indicada por una zona de razón constante o plateau.

El proceso utilizado aquí para medir la edad fue irradiar una muestra del meteorito y luego graficar la curva de fosforescencia correspondiente a la dosis artificial mas la dosis natural $TL(N + \beta)$. El test del plateau es ahora utilizado graficando la curva $TLN/(TL(N + \beta)-TLN)$ versus la curva de fosforescencia.

Uno de los problemas más frecuentes a encontrar en termoluminiscencia es la supralinealidad o crecimiento supralineal, descrito cómo una región donde hay un crecimiento lineal, antecedido por una región no lineal esto nos indica que tenemos problemas con las dosis bajas de radiación. En general el crecimiento supralineal se manifiesta cómo una región donde la curva de crecimiento en que la intensidad de la termoluminiscencia, I , se incrementa como una función de R^1 , en que 1 no es necesariamente 1 y tampoco un entero, y R es la radiación absorbida.

El problema que nos atañe con el comportamiento supralineal es que al impartir a la muestra varias dosis de radiación artificial sobre la dosis natural y dibujar $TL(A+N)$, si el crecimiento es perfectamente lineal, al dosis natural N puede obtenerse al extrapolar a cero la termoluminiscencia en cuyo punto la intersección dará el valor de la dosis requerida. Pero si el comportamiento es supralineal, la dosis natural **aparente N'** será subestimada del valor real por una cantidad I_0 . El problema es entonces estimar I_0 . El procedimiento a utilizar es una segunda curva fosforescente al cuál le son previamente vaciadas sus trampas de radiación natural y luego es re-irradiado en el laboratorio para darnos TLA. El crecimiento de la curva de TLA versus la dosis es así obtenido. Si no suceden cambios en las propiedades supralineares de la muestra durante la irradiación y lectura de datos I_0 puede ser estimado a partir de la segunda intersección I_N dónde $I_0=I_N$. Entonces la dosis natural es estimada cómo $N=N'+I_N$.

Discusiones y Resultados

1.- Obtención de la Dosis Anual de Radiación

Una de las cosas más importantes a determinar es la cantidad de radiación que reciben los cristales de Cuarzo por año. Para esto se ocuparon dosímetros de Sulfato de Calcio (CaSO_4) activados con Disproso (Dy) fabricados por Teledyne. Estos dosímetros fueron ocupados para medir tanto la radiación del terreno como la provenientes de las mismas rocas del meteorito.

- a) **Dosis del Terreno:** Los Dosímetros dejados por el grupo que viajó a Monturaqui y recuperados posteriormente, se les midió su radiación en el laboratorio de termoluminiscencia de la Facultad de Física por el Dr. Don Alvaro Roman arrojando como resultados:

$1,85 \cdot 10^{-3}$ y $2,04 \cdot 10^{-3}$ grey por año en aquellos que estaban a aproximadamente 15 cm de profundidad.

Mientras que otra muestra que estaba en la superficie arrojó como resultado $2,73 \cdot 10^{-3}$ grey por año, dado que probablemente recibió más radiación cósmica que el resto. Como las rocas que estudiamos fueron extraídas a una cierta profundidad, se usó el promedio de los dos primeros valores.

Entonces la Dosis anual que entrega el terreno es :

$1,95 \cdot 10^{-3} \pm 0,1 \cdot 10^{-3}$ grey por año.

- b) **Dosis Interna :** También es necesario medir la radiación que proviene de las mismas rocas del meteorito, la cual no tendría por que ser igual a la radiación entregada por el terreno, debido a su diferente composición, aunque esperamos que sea del mismo orden. Para esto colocamos los dosímetros antes mencionados entre piedras provenientes del meteorito, lo más juntas posible y envolvimos los conjuntos en papel de aluminio y fueron dejados dentro de un zócalo durante 26 días (17 de Agosto al 12 de Septiembre).

Los valores siguientes están expresados en unidades de carga eléctrica, pues el instrumental entrega valores de intensidad versus tiempo y nosotros pedimos una integración entre 150° y 320° C que es donde los dosímetros tiene los máximos más estables. Hay que notar que la temperatura tiene una correspondencia en tiempo pues el horno calienta a razón constante de 12° C por segundo.

En la siguiente tabla se muestra los valores de termoluminiscencia natural que mostraron los dosímetros. La columna Base muestra el valor de la intensidad debida a la radiación por el mero efecto del calentamiento del material (radiación térmica), por lo tanto la termoluminiscencia natural real será la primera medida menos la Base y le llamamos TLN neto. Para poder determinar a cuantos greys corresponden esta cantidad , se irradia el material en nuestra fuente beta durante un minuto (1,2 greys).

Tabla 1 – Radiación Interna

TLN(η C)	Base(η C)	TLN neto (η C)	1 minuto de β (μ C)
35,9	2,5	33,4	204
30,7	1,7	29,7	218
36,9	2,6	34,3	249
31	1,52	29,48	246
	Promedio	31,7 \pm 2,48	229,25 \pm 21,86

Pero además se debe considerar que el laboratorio agrega una cierta cantidad de radiación de alta penetración (rayos gamma y rayos cósmicos), que si bien es muy poca afecta a estos datos. Esta radiación “de fondo” agrega 0,5 η C por día por lo que tenemos 13 η C en total, por lo que nuestro valor de termoluminiscencia natural queda en 18,7 η C.

También se debe considerar que estos dosímetros tienen una cierta perdida de información la cual esta tabulada por su respectiva referencia técnica y esta expresada de la siguiente manera:

$$C = e^{-4,21 \cdot 10^{-4} \cdot T}$$

donde T es el numero de días en que se usó el dosímetro, en nuestro caso 26 días lo que nos da un valor para C de:

$$C = 0,98$$

Para calcular la dosis en grey que recibieron los dosímetros se les irradio durante un minuto en nuestra fuente beta (1,2 grey/minuto), se tiene entonces:

$$\begin{aligned} 1,2 \text{ grey} & \dots\dots\dots 229 \mu\text{C} \\ x \text{ grey} & \dots\dots\dots 18,7 \eta\text{C} \end{aligned}$$

$$x = 9,8 \cdot 10^{-5} \text{ grey}$$

Pero este valor representa el 98 % del valor recibido durante los 26 días, por lo que nuestro valor real es:

$x = 10^{-4}$ grey, entonces la dosis anual de radiación que reciben, los cristales provenientes de las mismas rocas es

$$D_{\text{interna}}^{\text{anual}} = \frac{10^{-4}(\text{grey}) \cdot 365(\text{días/año})}{26(\text{días})} = 1,4 \cdot 10^{-3}(\text{grey/año})$$

c) Por lo tanto la dosis total anual que reciben los cristales en su estado original es

$$D_{\text{anual}}^{\text{total}} = D_{\text{interna}}^{\text{anual}} + D_{\text{terreno}}^{\text{anual}} = 1,4 \cdot 10^{-3}(\text{grey/año}) + 1,95 \cdot 10^{-3}(\text{grey/año}) = 3,35 \cdot 10^{-3}(\text{grey/año})$$

2.- Obtención de la Paleodosi

La Paleodosi es la dosis total de radiación que recibieron los cristales de cuarzo desde la caída del meteorito, la cual al compararla con la dosis anual que reciben los cristales nos entrega el valor de la edad que tendría el cráter.

De la misma manera que en la sección anterior no sabemos cuantos radiación captan los cristales, por lo tanto la manera de obtener esto es compararlo con tiempos de nuestra fuente de radiación.

a) Termoluminiscencia Natural y Supralinealidad de la muestra:

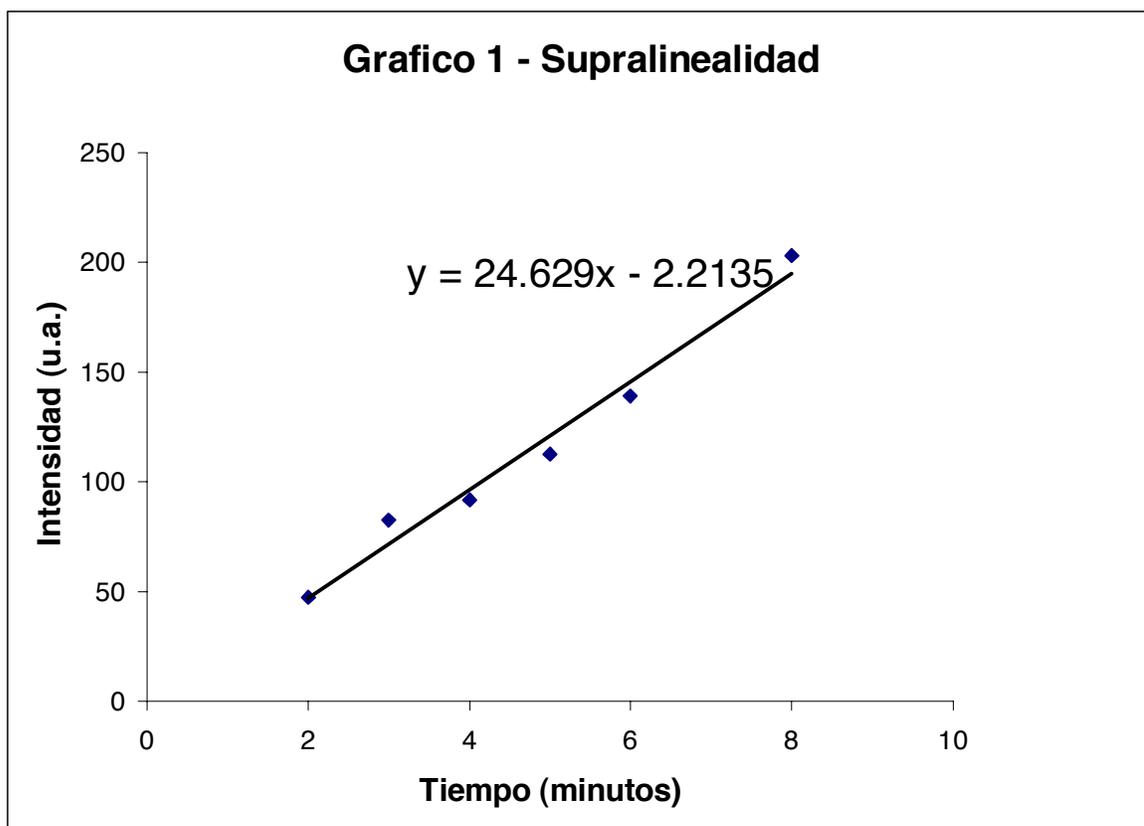
Los valores de intensidad de la TLN fueron obtenidos con una integración entre 330° C y 400° C que es donde las trampas estables (vidas medias superiores a 10^8 años) del cuarzo presentan sus máximos.

Es necesario también determinar si el material es lineal con respecto a los tiempos de irradiación, es decir que la intensidad de la luz emitida sea proporcional al tiempo durante el cual fue expuesta a la irradiación. Para determinar esto se “blanqueó” las muestras (se vacían las trampas por medio del calor) y se irradió durante unos minutos las diferentes muestras. En la siguiente tabla se presentan los valores de TLN, de la Base (correspondiente a la radiación térmica), de TLN neto, el tiempo en que fue sometido a la radiación beta de nuestra fuente y de la intensidad **I** de la luz emitida por este último proceso de irradiación y su una normalización de **I** al promedio de los valores de TLN, de las diferentes muestras

usadas. La normalización se aplicó debido que no hay modo de asegurar que las diferentes muestras tengan la misma masa u otras características idénticas. A continuación de esta tabla se presenta el gráfico de la intensidad normalizada contra el tiempo de exposición, mostrando la linealidad del material usado .

Tabla 2 – TLN y supralinealidad

TLN(μC)	Base(μC)	TLN neto (μC)	Tiempo (min)	I (ηC)	I normalizada (ηC)
30.12	2.43	27.69	2	51.5	47.47
26.57	2.56	24.01	3	77.5	82.39
28.08	2.48	25.6	4	92	91.73
30	2.55	27.45	5	121	112.52
28.83	2.42	26.41	6	144	139.18
29.37	2.46	26.91	8	214	203.
	promedio	26.345			



El en el gráfico se presenta la ecuación de la recta correspondiente a estos datos, la intersección con el eje X nos da el valor de 0.08 minutos. Este valor es bastante lo suficientemente cercano a cero como para desecharlo. En el caso de que no fuera así habría que agregárselo al calculo total de los minutos de fuente que tiene la muestra.

- b) Termoluminiscencia artificial (TLN + β): Como ya se indicó se tomó un poco de estos cristales de cuarzo y se le irradió con nuestra fuente beta por un periodo más prolongado, se probó primero con un tiempo de dos horas, pero la señal mostrada fue demasiado débil en comparación con los valores de TLN, después se uso un periodo de 20 horas mostrando saturación en la señal. Al final usamos 2 muestras cada una con exposiciones de 6 horas mostrando una buena señal. Los siguientes son los valores netos obtenidos con una integración como la señalada en el punto anterior

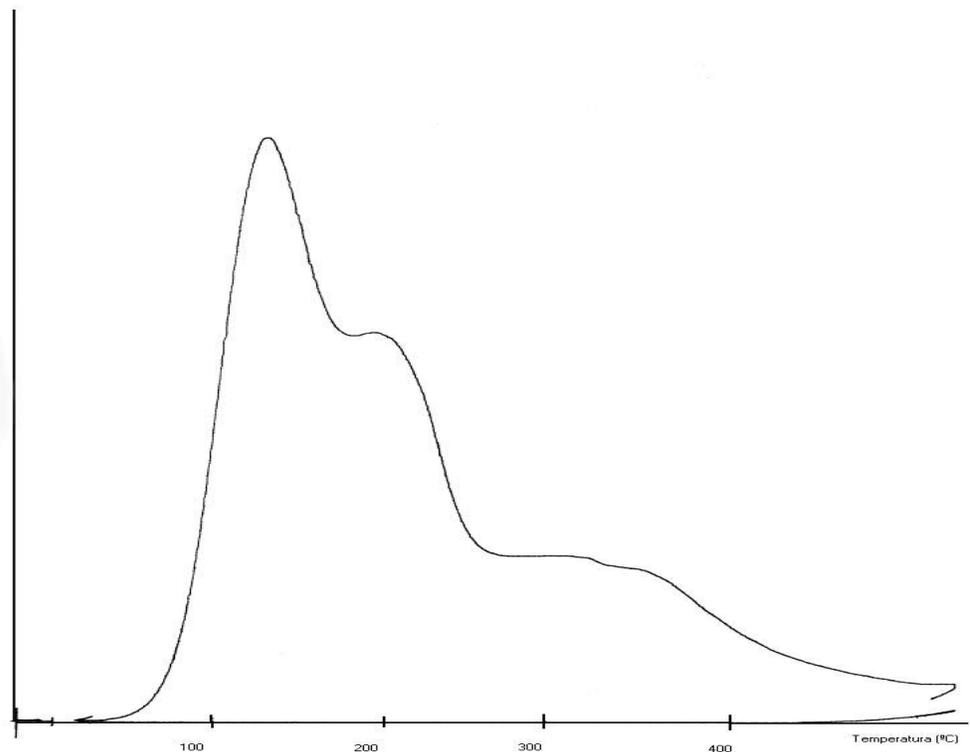
Muestra 1 : 42,01 μC

Muestra 2 : 37,05 μC

Promedio : 39,53 μC

A modo de ejemplo se presenta el siguiente gráfico de la curva de TLN + β , los gráficos de TLN tienen un aspecto similar , aunque no presentan el máximo inicial, puesto que este tiene vida media muy corta (de solo horas).

Gráfico 3 – TLN + β



El eje *Y* representa la intensidad de radiación y tiene unidades arbitrarias, aunque el equipo las entrega en unidades de corriente. Se puede ver en el extremo del eje *X* una pequeña curva que se levanta de este eje, esta corresponde a lo que llamamos base y corresponde a la radiación térmica emitida por el material al calentarse y debe restarse al valor de la curva de termoluminiscencia para obtener su verdadero valor.

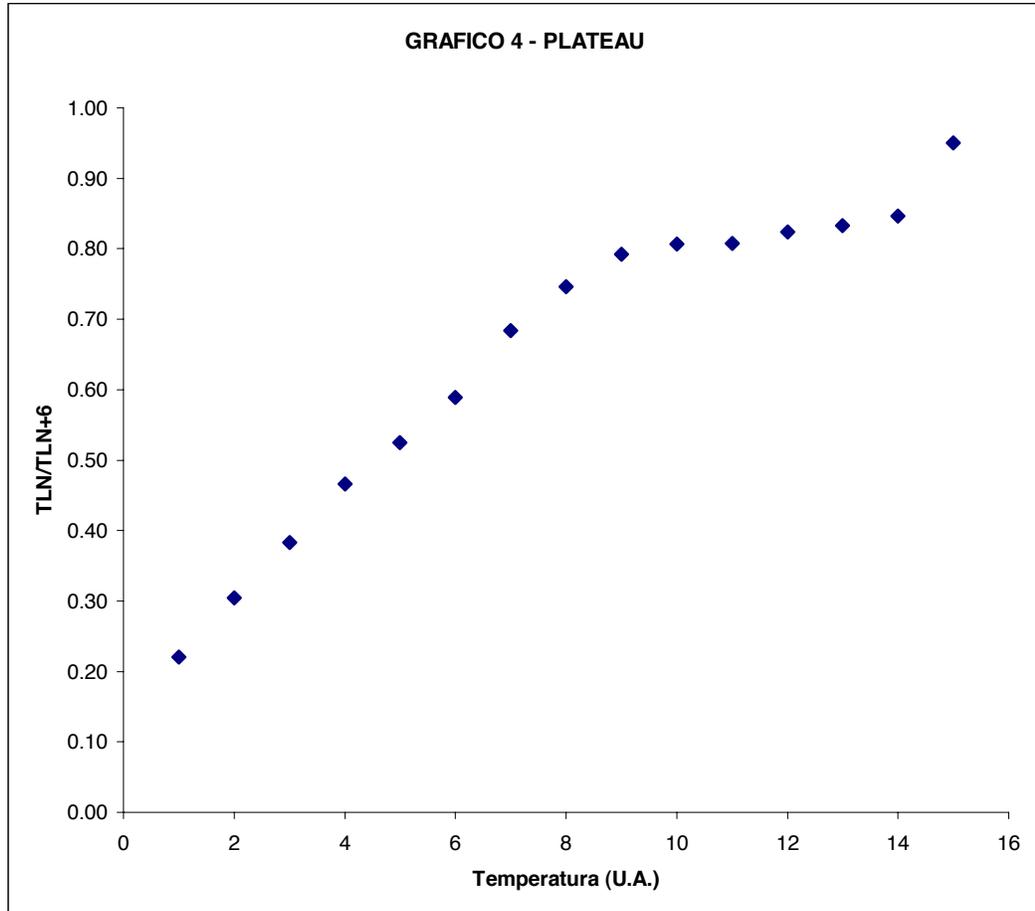
c) Plateau:

Este es el método que vamos a utilizar para estimar la edad del meteorito, pues es el que ofrece más garantías de precisión, pues nos asegura que estamos tomando en cuenta solo la emisión por trampas estables. Para hacer esto se toman los gráficos que nos entrega el ploter del equipo y se mide el valor de altura de cada curva, tanto de TLN como de TLN + β , como vamos a hacer la razón de estos valores, no es necesario preocuparnos por las unidades mientras trabajemos en la misma escala. Estos valores se grafican en función de la temperatura, sabiendo que el plotter grafica aproximadamente 2,7 °C por milímetro, pero del mismo modo podemos abstraernos de eso y tomar este valor como unidad.

Una vez ubicada la zona del Plateau, se toma el promedio de este y se procederá al calculo de la edad. A continuación la se presenta la tabla y el gráfico de este proceso.

Tabla 3 – Valores para el Plateau

Temperatura (ua)	TLN (U.A.)					TLN+6hrs de β (UA)			TLN/TLN+6
	I	II	III	IV	Promedio	I	II	Promedio	
1	14	9	16	10	12.25	57	54	55.50	0.22
2	19	13	21	14	16.75	56	54	55.00	0.30
3	23	17	24	18	20.50	55	52	53.50	0.38
4	26	21	27	22	24.00	53	50	51.50	0.47
5	28	23	28	25	26.00	51	48	49.50	0.53
6	28	24	28	26	26.50	46	44	45.00	0.59
7	27	25	26	26	26.00	39	37	38.00	0.68
8	24	24	22	24	23.50	32	31	31.50	0.75
9	21	22	20	21	21.00	27	26	26.50	0.79
10	18	18	17	18	17.75	22	22	22.00	0.81
11	16	16	15	16	15.75	20	19	19.50	0.81
12	15	14	13	14	14.00	17	17	17.00	0.82
13	14	12	12	12	12.50	15	15	15.00	0.83
14	12	11	10	11	11.00	13	13	13.00	0.85
15	10	10	8	10	9.50	10	10	10.00	0.95



Como podemos ver tenemos seis valores que conforman un buen plateau , los cuales solo tienen una leve tendencia al alza, sacando el promedio de estos valores tenemos:

Promedio del plateau: $0,82 \pm 0.0197$

Para calcular la dosis que recibieron los cristales del medio desde la caída del meteorito se usa la siguiente expresión:

$$Q = \frac{0,82}{1 - 0,82} \cdot 6(\text{hrs}) \cdot 60(\text{min}/\text{hr}) \cdot 1,2(\text{grey} / \text{min}) = 1968(\text{greys}) \pm 96(\text{greys})$$

Si dividimos este valor de Q por el valor de nuestra dosis anual tendremos el valor de la edad del meteorito.

$$EDAD = \frac{1968(\text{greys})}{3,35 \cdot 10^{-3} (\text{greys/año})} = 587462 \text{ años} \approx 590.000 \text{ años}$$

3.- Estimación del Error:

Es evidente que por el corto tiempo en que se realizó este estudio, no podemos asegurar la exactitud de nuestro resultado, sin embargo consideramos que es una buena aproximación, sobre todo cuando los diferentes estudios de tipo geológico le dan una edad para este cráter de entre 100.000 y 1 millón de años.

Nosotros hemos estimado un error asociado a nuestro dato, que está basado principalmente en consideraciones estadísticas, pues cada dato tiene una cierta imprecisión.

Imprecisión de la Dosis anual = $0.1 * 10^{-3}$ grey/año

Imprecisión de la Paleodosis = 96 greys

Imprecisión de la Edad = 28.700 años aproximadamente

Conclusiones

A pesar de relativo bajo error obtenido, no podemos tener una completa seguridad de los resultados conseguidos, pues solo tomamos un grupo de muestras muy pequeña y durante un tiempo muy corto para este tipo de estudios. Para poder tener un dato más fiable necesitaríamos hacer un estudio más acabado lo cual demoraría varios meses.

Bibliografía

- McKeever, S.W.S – Thermoluminescence of solids – Cambridge University Press 1985
- Aitken, M.J. – Thermoluminescence dating – Academic Press 1984
- Bárcena, J. Roberto – Arqueología de Mendoza, Apéndice: fechados arqueológicos por termoluminiscencia por Alvaro Román y Angel Deza – EDIUNC 1998
- <http://gdcinfo.agg.nrcan.gc.ca>