

00569

Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Química  
División de Estudios de Posgrado

---

2

**INFORME DE TRABAJO**

**EL LABORATORIO DE FECHAMIENTO POR TERMOLUMINISCENCIA  
DEL INSTITUTO DE GEOFISICA UNAM  
(Aplicación y Desarrollo de Metodologías y Técnicas)**

**EXAMEN GENERAL DE CONOCIMIENTOS  
E INFORME DE TRABAJO QUE PRESENTA EL  
I.Q. ANGEL RAMIREZ LUNA  
PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS: GESTION DE TECNOLOGIA**

292888



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **A mis padres Teresa y Manuel**

### Agradecimientos:

Al Dr. Peter Schaaf por darme la oportunidad de trabajar con él, sobre sus enseñanzas y consejos al emprender el proyecto del Laboratorio de Fechamiento por TL.

Al Ing. Teodoro Hernandez por su asesoría en el proceso de preparación de las muestras geológicas.

Al Dr. Pedro González por su colaboración en el estudio de las técnicas de fechamiento.

Al personal del Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica del IGEF UNAM

Al personal del Laboratorio de Química Analítica del IGEF UNAM

Al personal del Reactor Nuclear y del Microscopio de Barrido Electrónico del ININ

A todos los compañeros del Instituto de Geofísica y del Instituto de Geología por su ayuda para realizar diariamente mi trabajo.

Al CONACYT y DGAPA por su apoyo en los proyectos del laboratorio.

## RESUMEN

---

A partir de la creciente demanda generada por geocientíficos en el fechamiento de sus muestras geológicas, así como también la necesidad tanto de arqueólogos como de antropólogos en el fechado y autenticación de piezas arqueológicas, en 1995 el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México emprendió el proyecto para desarrollar y poner en operación un laboratorio de fechamiento geológico y arqueológico empleando el método de termoluminiscencia y con ello dar solución a las necesidades surgidas. Para lograr esto, entre otras cosas se requirió del acondicionamiento en infraestructura del laboratorio, de la formación de recursos humanos especializados, de la selección y compra del equipo y de la asimilación y desarrollo de las técnicas analíticas y operativas relativas al fechamiento.

En este informe de trabajo se presentan las actividades desarrolladas dentro de este laboratorio, algunos ejemplos de fechamiento y los resultados obtenidos, el éxito logrado en el establecimiento de este laboratorio además de confirmar la importancia de contar con un método de fechamiento práctico y confiable, se visualiza el extenso campo de aplicación de este método bajo el esfuerzo de nuestra universidad de establecer en México laboratorios eficientes y reconocidos.

## CONTENIDO

	PAGINA
1. INTRODUCCION	1
2. ANTECEDENTES	2
2.1 Fenómeno Termoluminiscente	2
2.2 Fechamiento por TL	6
3. EL LABORATORIO DE TERMOLUMINISCENCIA	10
3.1 Infraestructura	10
3.2 Colaboraciones	12
3.3 Licencias de Operación	13
3.4 Localización y Personal Responsable	13
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL	14
4.1 Desarrollo Experimental	14
4.1.1 Viabilidad de fechamiento	14
4.1.2 Toma de muestras en campo	14
4.1.3 Medición de la tasa de dosis anual gamma y cósmica	15
4.1.4 Análisis petrográfico	15
4.1.5 Separación de minerales y preparación de la muestra	15
4.1.6 Determinación de la paleodosis y técnica de irradiado	16
4.1.7 Determinación de la tasa de dosis anual	17
4.1.8 Determinación del factor de eficiencia alfa/beta (factor k)	17
4.2 Ejemplos de Fechamiento	18
4.2.1 Fechamiento arqueológico	18
4.2.2 fechamiento geológico	21
5. RESULTADOS	25
5.1 Proyectos	25
5.2 Publicaciones	25
5.3 Sitios de Estudio	26
5.4 Congresos	26
5.5 Estudiantes y Tesistas	27
5.6 Colaboración con otras Instituciones	28
5.7 Divulgación del Servicio	28
6. CONCLUSIONES	29
7. BIBLIOGRAFIA	31

## 1. INTRODUCCION

La Termoluminiscencia (TL) es un método de fechamiento que se basa en la determinación de los efectos causados por la radiación ionizante sobre la estructura de una red cristalina, en la cual, considerando ciertos factores que son inherentes a cada tipo de muestra nos proporciona una alternativa para determinar su edad.

La gran demanda en el fechamiento de materiales geológicos cuaternarios y arqueológicos requieren de un método práctico y confiable y la termoluminiscencia es actualmente una herramienta promisoría para este propósito, aportando así ayuda al extenso campo de la geofísica, geología, arqueología y de muchas otras ciencias en el establecimiento de inferencias sobre condiciones y características sufridas por la Tierra en el pasado. El rango de edad para fechamiento por TL es de 100 hasta 800 000 años aproximadamente. Sin embargo, el límite superior de fechamiento esta en función de la tasa de dosis anual que recibe la muestra en su medio natural hasta llegar al punto de saturación, en otros términos, de la capacidad de almacenamiento de la información, es decir, entre mas tiempo tarde en saturarse el material mayor será el alcance del fechamiento. Una de las características que hacen al método TL atractivo es el rango de edad, ya que cubre un periodo en la escala de tiempo el cual queda fuera del alcance de otros métodos conocidos como el de radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ) y el de potasio-argón (K-Ar), en algunos casos la insuficiencia o total ausencia de material orgánico o geológico fechable imposibilita la aplicación de estos métodos de fechamiento, dando espacio al fechamiento por TL, además, este método puede funcionar a manera de argumento, corroborando y apoyando los resultados obtenidos por otros métodos.

Por otro lado, el método de TL ofrece alternativas de fechamiento para las muestras de origen geológico según sea el punto de interés, se puede determinar tanto la edad de la formación de la estructura como en el caso de una pómez o flujo de lava, como de la última exposición a la luz solar como en el caso de las paleodunas o de sedimentos lacustres. En el campo de la arqueología y antropología el fechamiento de cerámicas o figuras proporciona una gran ayuda al establecimiento de secuencias cronológicas de las antiguas culturas, comparando la edad calculada por TL, su forma, estilo y funcionalidad con los eventos relevantes ocurridos en ellas. Hoy día, la falsificación de piezas arqueológicas se ha convertido en un serio problema, tanto para coleccionistas como para arqueólogos y museos donde se exhiben y estudian estas piezas, de manera que los expertos enfrentan cada vez más serias dificultades para legitimar su autenticidad, la termoluminiscencia ofrece la oportunidad de saber sin lugar a dudas la autenticidad de una pieza arqueológica.

En 1995 el instituto de Geofísica emprendió la puesta en marcha del laboratorio de fechamiento por TL con el fin de poner al alcance de los investigadores una solución a sus necesidades de fechamiento, al momento en el laboratorio se ha puesto a punto las técnicas de fechamiento, así mismo se ha formado y mantenido una estrecha colaboración con investigadores de diferentes áreas e instituciones nacionales y extranjeras, la publicación de artículos ha tenido lugar en revistas internacionales presentando resultados de interés para la comunidad científica, sea asesorado y capacitado a estudiantes de posgrado en materia de fechamiento por TL y se ha participado en congresos especializados y pláticas libres de divulgación de la ciencia.

Por todo esto, se puede constatar la importancia de contar con un laboratorio de fechamiento por TL en México, hasta el momento es el único laboratorio en funcionamiento en Latinoamérica, la mayoría de este tipo de laboratorios se encuentran en Europa, Canadá y Estados Unidos, de manera que su ubicación geográfica y facilidades técnicas derivadas de la misma ofrecen una favorable expectativa de futuro desarrollo, además de su valiosa aportación de elementos al acervo de conocimientos.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Fenómeno Termoluminiscente

Ciertos cristales al ser irradiados tienen la propiedad de emitir luz si se eleva su temperatura a un valor suficiente por abajo de su temperatura de incandescencia. A este fenómeno se le conoce como radioluminiscencia térmicamente estimulada, sin embargo, por razones históricas se le llama radiotermoluminiscencia o simplemente **termoluminiscencia**. La importancia de este fenómeno radica en el hecho de que la cantidad de luz emitida es proporcional a la dosis absorbida por el material irradiado. Este principio se aprovecha en arqueología ya que la mayoría de las cerámicas contienen cristales en su composición y estos presentan el fenómeno termoluminiscente, el punto de partida del fechamiento radica en determinar cuando fue cocida esta cerámica (borrado de la señal TL) y a partir de este momento comienza nuevamente a interaccionar la radiación proveniente tanto de sus componentes como de su entorno sobre sus cristales y de esta manera excitar sus electrones dando lugar a una paulatina formación de entes móviles a través de los años (almacenamiento de la señal TL). El mismo principio se aplica a las muestras geológicas solo que en ellas el punto de partida es la fecha de formación de los cristales (flujos de lavas, tefras, cenizas, etc.) o su última exposición a la luz solar (paleodunas, sedimentos lacustres, etc.).

El mecanismo general para explicar el fenómeno TL es el siguiente: al irradiar el cristal, su estructura sufre alteraciones por la ionización, en este proceso se liberan electrones de la red y se generan dos tipos de entes móviles: electrones y agujeros, ambos portadores de carga, que pueden viajar por el cristal hasta quedar atrapados en defectos de la red, generando centros de color. Los electrones y agujeros permanecen atrapados hasta que se proporciona al cristal la energía térmica o luminosa suficiente para liberarlos, volviéndolos a su estado natural que tenían antes de la irradiación. Cuando esto ocurre, se desprenden del exceso de energía que adquirieron, emitiendo fotones de luz. Existe un modelo para explicar este fenómeno a partir de la existencia de tres elementos principales: Los centros de recombinación, los entes móviles o portadores de cargas y las trampas. Además, se usa el modelo de bandas del sólido respecto a sus estados electrónicos de energía (figura 1). Se supone que en la banda prohibida (B.P.) existen estados excitados de energía que tienen una vida media relativamente grande (estados metaestables), que son producidos por defectos de la red cristalina del material y pueden funcionar como trampas o centros de recombinación. Al interaccionar la radiación ionizante con el sólido, se puede proporcionar la energía suficiente para crear entes móviles; es decir, los electrones y los agujeros. Los primeros son transferidos de la banda de valencia (B.V.) a la banda de conducción (B.C.) mientras que los agujeros quedan en ésta al ocurrir la transferencia de electrón, como lo muestra la figura 1. Estos portadores de carga viajan por el cristal hasta que se recombinan; o bien, son atrapados por estados metaestables de energía asociados con los defectos del material, tal como se muestra en la figura 2a. Posteriormente durante el calentamiento del sólido irradiado los electrones y agujeros son desalojados de sus trampas para viajar por el cristal, hasta que se recombinan emitiendo un fotón de luz visible como se muestran en las figuras 2b, 2c y 2d.

El proceso de emisión luminosa durante el calentamiento del cristal implica la desocupación de las trampas en el cristal. Este proceso se muestra en la figura 3, la curva superior representa la probabilidad de desocupación de las trampas en función de la temperatura; a medida que aumenta la temperatura la probabilidad de que las trampas se desocupen aumenta y una fracción de los portadores de carga liberados se dirige a los centros de recombinación haciendo que disminuya la población de los portadores de carga atrapados, por lo que la intensidad de luz emitida alcanza un máximo dando origen a un patrón de luminiscencia en función de la temperatura llamado curva TL.

Si el cristal contiene mas de un tipo de trampas (que es lo mas común) este proceso se repite para cada grupo de trampas, dando lugar a varios puntos de máxima intensidad de emisión luminosa en la curva TL, los cuales se conocen comúnmente como picos TL. Cada pico esta caracterizado por la temperatura a la cual se presenta la máxima intensidad de emisión ( $T_m$ ), por la energía de activación o profundidad de la trampa ( $E$ ), probabilidades de recombinación ( $p$ ) y por el factor preexponencial o factor de frecuencia ( $s$ ).

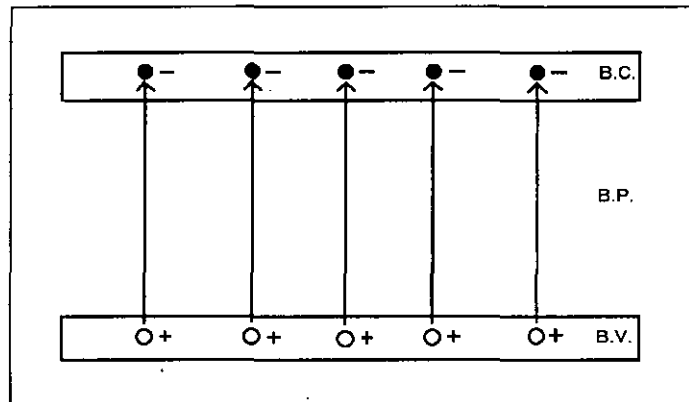


Figura 1: formación de entes móviles o portadores de carga, las notaciones B.C., B.P. y B.V. significan banda de conducción, banda prohibida y banda de valencia respectivamente.

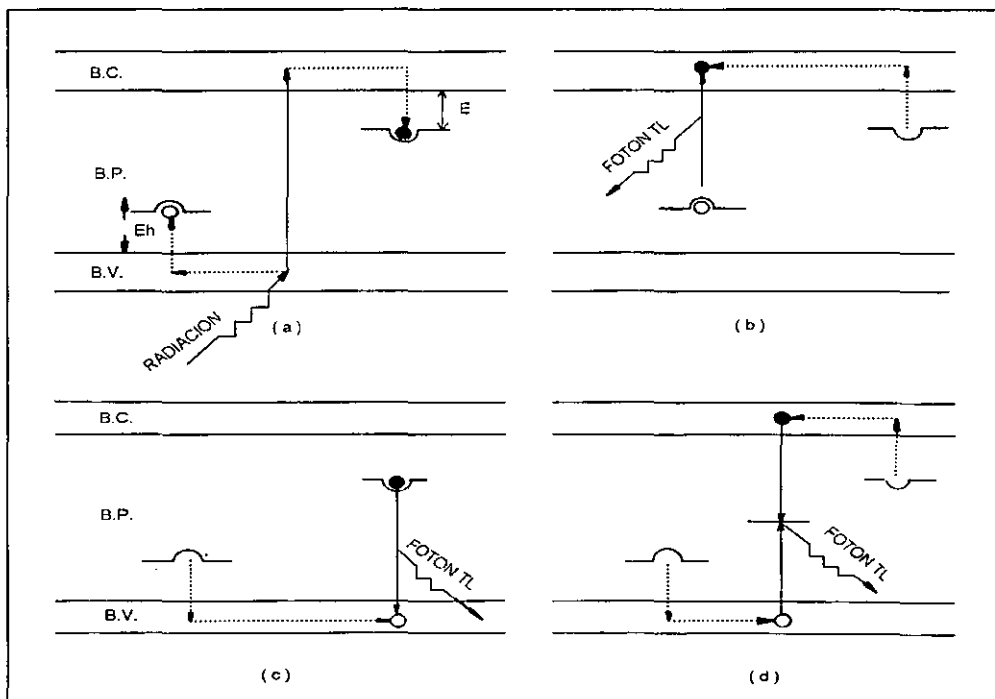


Figura 2: diagramas de bandas de energía del fenómeno de termoluminiscencia, en el inciso a) un electrón es excitado por efecto de la radiación dejando la banda de valencia y pasando a la banda de conducción hasta que finalmente queda atrapado en la banda prohibida (estado metaestable), los incisos b), c), y d) representan la emisión de fotones al regreso de los electrones a su estado base a causa de una desexcitación provocada por un agente como la temperatura o luz.



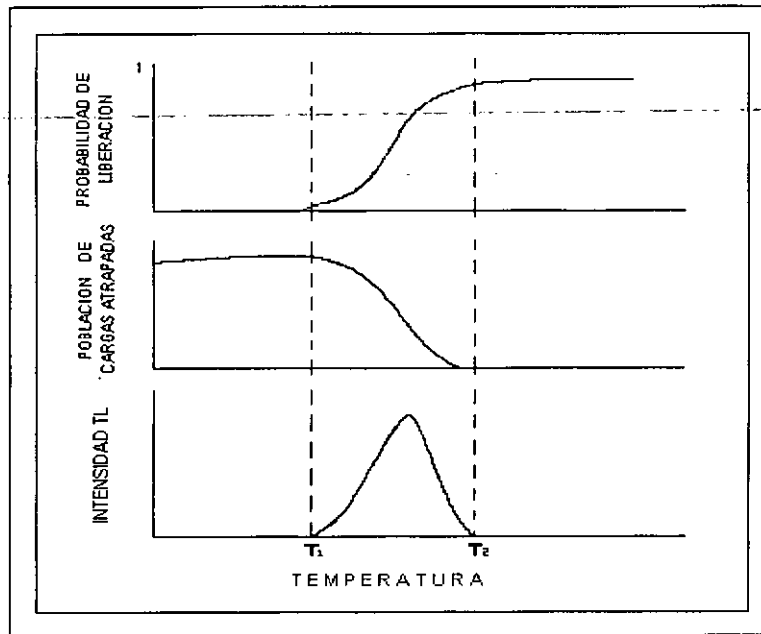


Figura 3: proceso de formación de la curva termoluminiscente.

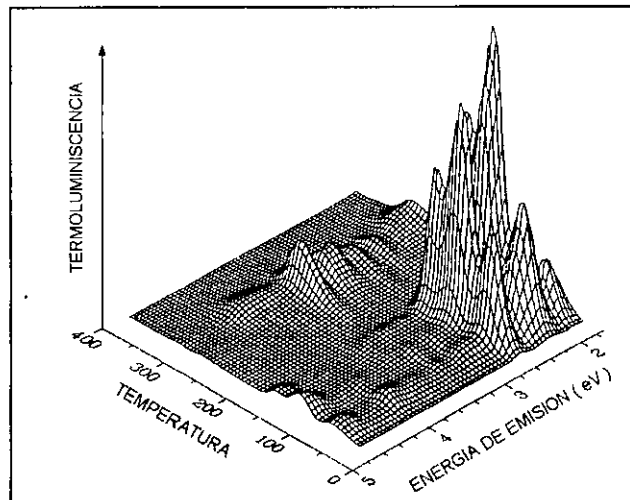


Figura 4: típica curva termoluminiscente tridimensional, la cual proporciona información de cada pico TL tal como la energía de emisión a la que se forma.

Los fotones emitidos durante el fenómeno TL corresponden a diferentes energías lo que se traduce en términos de longitud de onda, de manera tal que el espectro TL está delimitado por tres dimensiones las cuales son mostradas en la figura 4, sin embargo, para fines de aplicación el espectro es "cortado" mediante el uso de un filtro el cual permite solo los fotones de cierta longitud de onda previamente seleccionada, el espectro entonces se transforma en dos dimensiones haciendo de esta manera más práctico y fácil su análisis para su aplicación en la dosimetría y fechamiento. La respuesta TL de cualquier mineral que presente este fenómeno, comprende por lo general cuatro regiones: supralineal, lineal, sublineal y de saturación, como se muestra en la figura 5. La región lineal es la más importante ya que en ella se realizan las mediciones con la máxima precisión. Esta zona está limitada por los fenómenos generadores de las señales espurias, los cuales alteran las mediciones reales. Para fines prácticos se recomienda utilizar la región lineal de respuesta TL del material en cuestión.

En la región de supralinealidad, la sensibilidad de muchos materiales se incrementa con la dosis, el origen de este fenómeno aún no está bien determinado y puede ser diferente según el material considerado. Si bien, la sensibilidad del material es mayor en la zona, la precisión de las mediciones es menor a la que se obtiene en la zona lineal. Esto se debe a la necesidad de introducir algún factor de corrección, el cual genera errores suplementarios y que varían considerablemente con la transferencia lineal de energía de la radiación. La zona de sublinealidad se presenta por la inversión de la sensibilidad, ésta antecede a la zona de saturación, donde todas las trampas están ocupadas. En la zona de saturación se presenta coloración de los cristales y ocurre la destrucción de ciertos elementos de la estructura cristalina por efecto de la radiación.

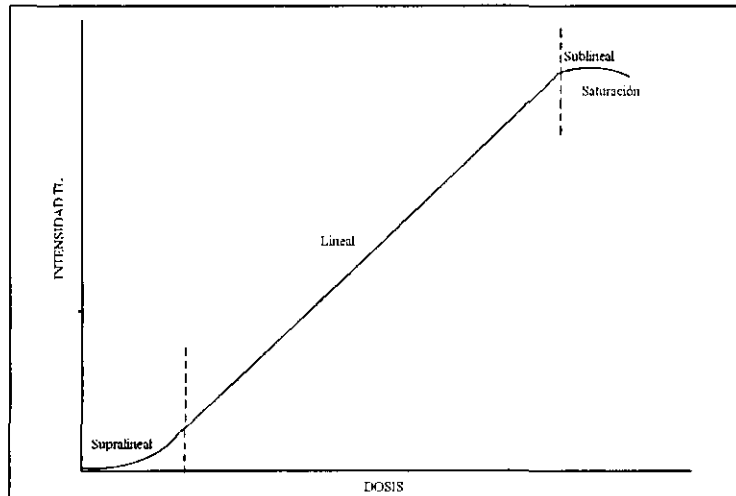


Figura 5: respuesta termoluminiscente en función de la dosis

Ahora bien, el estudio de la cinética del proceso de TL implica la investigación de las transiciones electrón-agujero entre estados de energía relacionados con las diferentes imperfecciones (impurezas y defectos), tanto durante la irradiación de la muestra como durante el proceso de lectura. Los diversos fenómenos relativos a la excitación TL y al proceso de lectura se describen con referencia a las transiciones de electrones y agujeros entre la banda de valencia y la de conducción del material TL y los estados localizados de los centros de atrapamiento y recombinación. La descripción de estos procesos se lleva a cabo mediante parámetros relacionados con las imperfecciones, tales como energía de activación, probabilidad de recombinación y factor de frecuencia, dichos parámetros determinan el tipo de cinética que se puede esperar; por ejemplo, linealidad de la respuesta TL en función de la dosis, dependencia de la rapidez de dosis durante la irradiación y primer orden, segundo orden o cualquier otro tipo de cinética durante la lectura. Considerando una cinética de orden general se tiene:

$$I = s n_0 e^{-E/kT} \left[ (b-1) \frac{s}{\beta} \int_{T_0}^T e^{-E/kT} dT + 1 \right]^{-\frac{b}{b-1}}$$

Donde:

- $I$  = intensidad de la TL
- $s$  = factor de frecuencia
- $n$  = electrones excitados
- $E$  = energía de activación
- $k$  = constante de Boltzmann  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$
- $T$  = temperatura (K)
- $\beta$  = velocidad lineal de calentamiento

## 2.2 Fechamiento por TL

A principios de los años 40, con la llegada de tubo fotomultiplicador (TFM) la TL fue considerada como herramienta para la identificación de minerales para usos geológicos, siendo por lo tanto el estudio del fenómeno de interés en física y química. A principios de los años 50, este método se uso para dosimetría de la radiación ionizante, fue a partir de los trabajos de Farrington Daniels en la Universidad de Wisconsin, donde este fenómeno fue sugerido para la determinación de la edad de muestras arqueológicas. En los inicios de los años 60 la TL fue aplicada por primera vez para fechar muestras de alfarería antigua en la universidad de Berna y en California. Actualmente diferentes laboratorios en el mundo consideran el uso de la TL como un método promisorio para fechar muestras geológicas del cuaternario y arqueológicas o para comprobar la autenticidad en cerámicas de arte.

El fechamiento por TL realizada por Göksu en Birmingham permitió estimar edades del periodo paleolítico que va mas allá del intervalo de fechamiento del  $^{14}\text{C}$ . El estudio de varios tipos de sedimentos en la antigua URSS fueron importantes para la geología y arqueología. La TL es también usada para el estudio de muestras de meteoritos y material lunar. En general, en todas las aplicaciones los límites de fechamiento son dependientes de las características propias de cada material.

Para propósitos de fechado generalmente se trabaja con niveles muy bajos de intensidad TL y es solamente con el uso del TFM que ha sido posible hacer de la TL un método atractivo para fechamiento.

Como ya se menciona, al calentar la muestra ésta emite fotones de diferentes energías o longitudes de onda, la figura 4 nos muestra un ejemplo de este fenómeno, es esta en realidad la imagen de un espectro termoluminiscente, sin embargo, para fines de aplicación se selecciona un filtro que permita el paso de fotones con energías de emisión características, con esto se facilita su visualización y su estudio. Se debe seleccionar un filtro que proporcione una curva de brillo con picos TL lo mas definidos posibles. La figura 6 muestra un equipo lector de termoluminiscencia convencional, el cual define la curva termoluminiscente como el registro de la emisión luminosa de un material TL previamente expuesto a la radiación, en función de la temperatura de calentamiento. Cuando la luz incide en el fotocátodo (figura 6) se genera una emisión de electrones en el material fotoeléctrico con el cual el fotocátodo ha sido recubierto (como el tipo bialcalino SbKCs), estos electrones son atraídos por el polo positivo en el primer dínodo y a causa del recubrimiento que posee este (como el Sb-Cs) dos o tres electrones son emitidos por cada fotoelectrón que incide. Estos electrones son atraídos hacia el segundo dínodo donde se incrementa la multiplicación, (en un buen TFM con diez dínodos varios millones de electrones alcanzan al ánodo por cada electrón que sale del fotocátodo debido a la llegada de un fotón de luz). Los pulsos del ánodo son amplificados y enviados a un contador, la cantidad de pulsos registrados es proporcional a la intensidad TL, esta información llega finalmente a una PC donde es digitalizada y almacenada para su análisis. En un sistema convencional la muestra se calienta por medio de un contacto de níquel-cromo (o tantalio) la muestra generalmente se encuentra sobre un disco de aluminio, acero o plata, la temperatura se mide por medio de un termopar comúnmente de "cromel-alumel" el cual se conecta bajo la plancheta o disco, es de vital importancia que la velocidad de calentamiento sea reproducible de una lectura a otra. Un aspecto muy importante para la medición de la TL es la selección de un buen filtro que permita la visualización de fotones de cierta energía de emisión, generalmente, un filtro optimo proporciona un a curva TL con picos bien definidos.

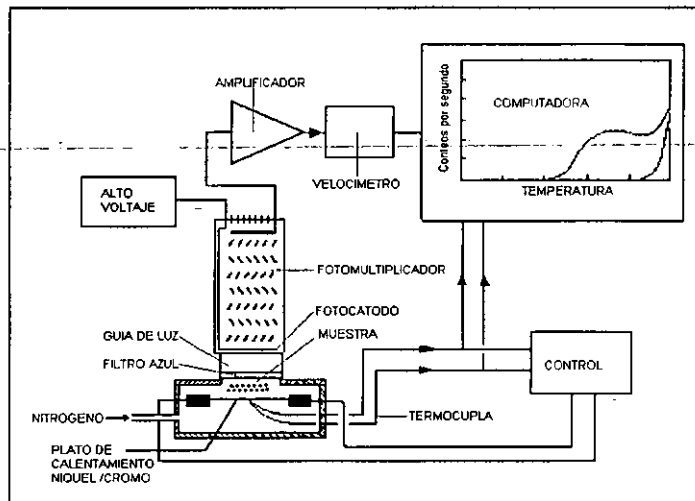


Figura 6: diagrama de un aparato lector de termoluminiscencia convencional

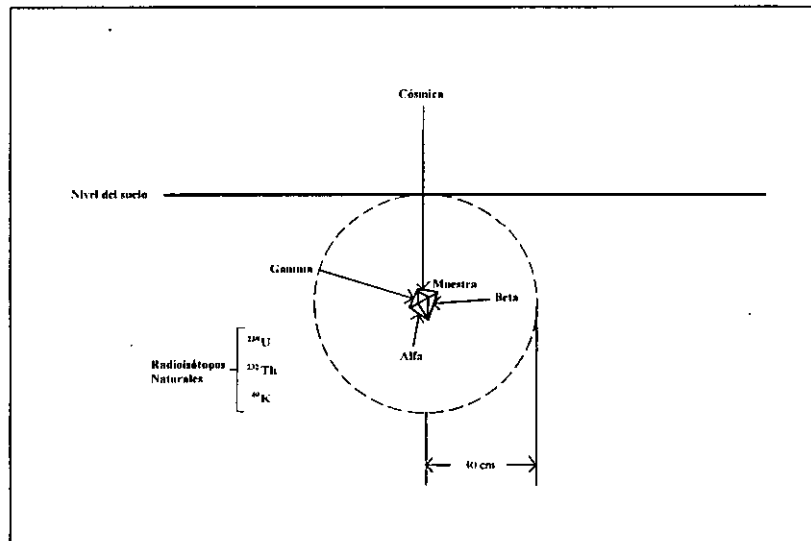


Figura 7: principio de adquisición de la paleodosis

La dosis que ha recibido la muestra en su entorno natural a través del paso de tiempo denominada paleodosis esta representada en la figura 7, esta paleodosis esta compuesta por las dosis alfa, beta, gamma y cósmica, a excepción de la dosis cósmica, las demás provienen de la desintegración radiactiva de los elementos naturales  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  y  $^{87}\text{Rb}$  principalmente, los cuales tienen vidas medias de varios miles de millones de años por los que se les puede considerar como una fuente constante de irradiación para las edades estimadas por el método TL. Estos elementos están presentes también dentro de la misma composición de la muestra por lo que además se debe considerar la autoirradiación que se genera.

La intensidad TL natural es proporcional a la dosis que han recibido los minerales presentes en la muestra de interés (geológica o arqueológica) a lo largo de los años, por lo que la edad se puede expresar como:

$$\text{Edad (años)} = \frac{\text{TL natural de los minerales}}{\text{TL adquirida al año}}$$

La TL natural es conocida también como paleodosis la cual esta compuesta por la dosis equivalente (Q) y el factor por supralinealidad (I), considerando la contribución de las partículas alfa ( $\alpha$ ), de las partículas beta ( $\beta$ ), de la radiación gamma ( $\gamma$ ) y de la radiación cósmica (c), la TL adquirida al año se transforma, por lo que la ecuación anterior toma la siguiente forma:

$$\text{Edad (años)} = \frac{Q + I}{D_{\alpha} + D_{\beta} + D_{\gamma} + D_c}$$

Donde: Q = Dosis equivalente  
I = Factor por supralinealidad  
 $D_{\alpha}$ ,  $D_{\beta}$ ,  $D_{\gamma}$  y  $D_c$  = Dosis anual de radiación alfa, beta, gamma y cósmica

Para efectos de fechamiento en las ecuaciones anteriores solamente se considera la TL que corresponde a la región estable del espectro, con el estudio o prueba de la meseta se identifica claramente esta región. En la prueba de la meseta (figura 8), la forma de la curva TL natural (la curva TL observada de una muestra que no ha recibido ninguna irradiación artificial) se compara con la curva TL artificial observada como resultado de la irradiación de la muestra por medio de una fuente artificial. La región continua conocida como "meseta" indica claramente que las trampas son lo suficientemente profundas como para permanecer inalteradas a lo largo del tiempo. De tal manera que la razón constante entre la curva TL natural y la curva TL artificial da una indicación de que, en el intervalo de esta región de la meseta, ha habido una liberación despreciable de electrones desde el momento en que se quedó sepultada la muestra hasta el momento de tomar las lecturas.

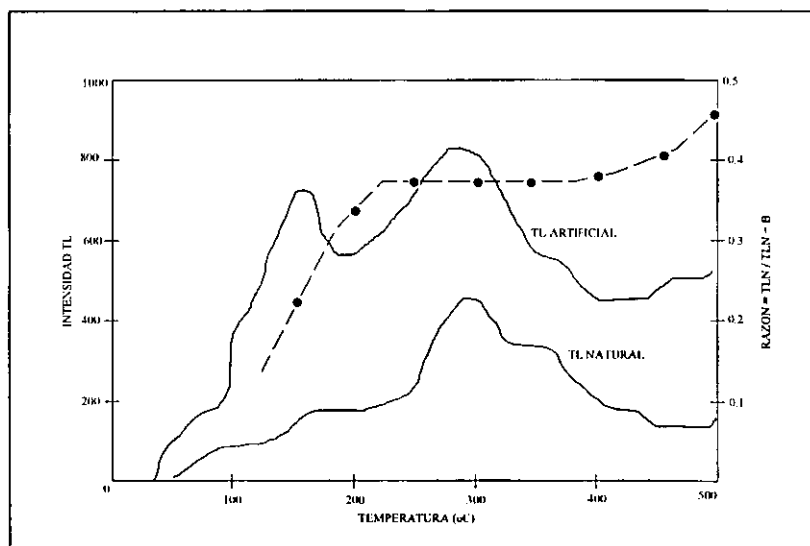


Figura 8: prueba de la meseta, se gráfica la razón (TL Natural / TL Natural + Dosis Artificial Beta) en función de la temperatura.

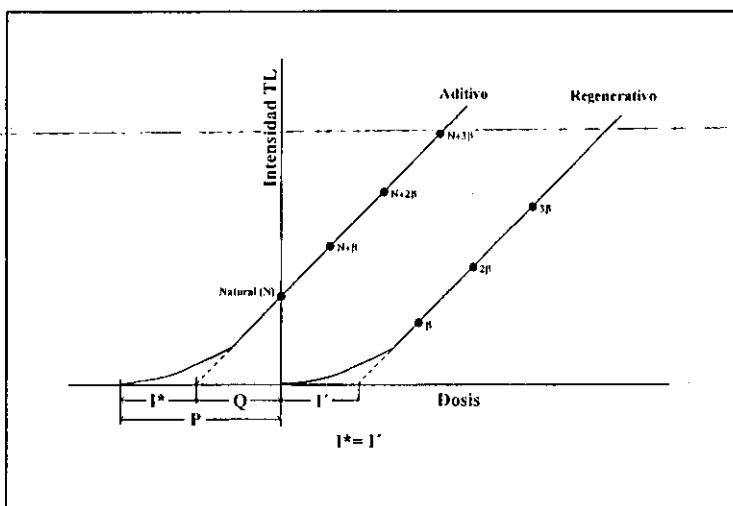


Figura 9: factor por supralinealidad

En la figura 9 esta representado gráficamente el factor por supralinealidad ( $I$ ) y su estimación. Partiendo de la regresión lineal durante el método aditivo para calcular la paleodosis ( $P$ ) podemos apreciar que existe una dosis que denominaremos  $I^*$  por efectos inherentes al fenómeno de termoluminiscencia y que escapa a los cálculos, una segunda irradiación es necesaria para estimar esta dosis no contemplada, teniendo como resultado el factor  $I'$ , considerando la equivalencia de  $I^*=I'$  es posible estimar este factor por supralinealidad, de manera tal que la paleodosis la podemos conformar por la dosis equivalente  $Q$  y el factor por supralinealidad  $I$ .

Existen básicamente dos técnicas para fechar: la técnica de grano grueso con un tamaño de grano entre  $105$  y  $125\mu\text{m}$  la cual es usada generalmente para muestras geológicas, en esta técnica se separan los minerales de interés (espectro TL caracterizado) como el del cuarzo o las plagioclasas hasta llegar a una concentración del 98% del mineral. Por otro lado se tiene la técnica de grano fino con un tamaño de grano entre  $4$  y  $11\mu\text{m}$  usada para muestras arqueológicas, en esta técnica se emplea la muestra total sin separar, esto obedece a que la cantidad de muestra arqueológica es comúnmente poca, así como con tamaño de granos muy pequeños (arcilla o barro).

## 3. EL LABORATORIO DE TERMOLUMINISCENCIA

### 3.1 Infraestructura

El laboratorio de fechamiento por termoluminiscencia se encuentra dividido en dos laboratorios principales, uno de ellos utilizado para la preparación de las muestras y que comprende los procesos de trituración, molido, separación magnética y líquidos pesados, el segundo laboratorio funciona para el análisis de las muestras, el cual alberga el equipo de termoluminiscencia.

La inversión en instalaciones, equipo y sistemas auxiliares de este laboratorio asciende a aproximadamente 90 000 dólares.

El laboratorio de preparación de muestras cuenta con el siguiente equipo:

- ◆ molino triturador SEW-EURODRIVE TYPE R60DT100L-4, con una potencia de 3hp, utilizado para la molienda de materiales geológicos y arqueológicos.
- ◆ separador magnético FRANTZ MAGNETIC BARRIER LABORATORY SEPARATOR MODEL LB-1 (figura 10), este equipo cuenta con un electroimán que genera un campo magnético, el cual actúa separando los minerales de acuerdo a sus gradientes en sus susceptibilidades magnéticas.
- ◆ sistema de líquidos pesados para la separación de minerales como cuarzos y feldespatos.

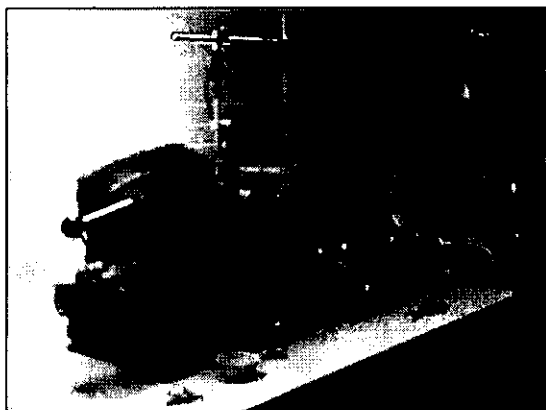


Figura 10: separador magnético FRANTZ MAGNETIC BARRIER LABORATORY SEPARATOR MODEL LB-1.

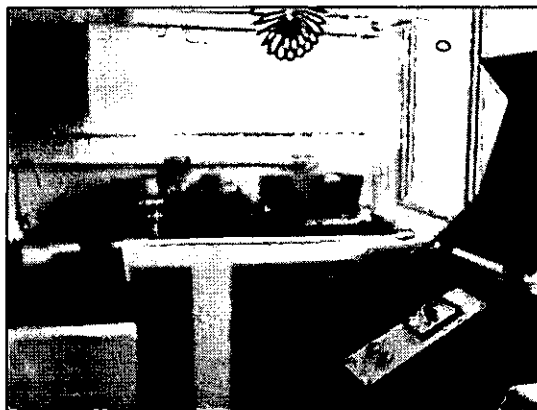


Figura 11: trituradoras y molinos del laboratorio de separación de minerales.

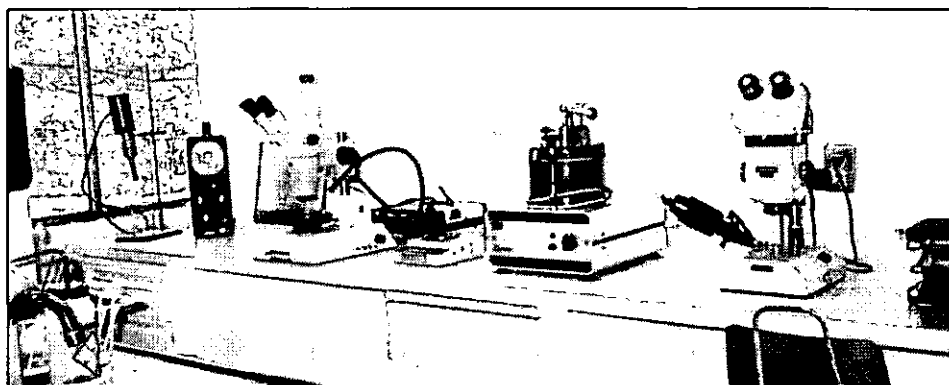


Figura 12: laboratorio de separación de minerales del Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS).

El laboratorio de análisis cuenta con el siguiente equipo:

◆ Lector de termoluminiscencia DAYBREAK 1100 AUTOMATED TL SYSTEM (figura 13), con un sistema adicional para pruebas por Optical Stimulated Luminescence (OSL), controlado desde una PC y con una capacidad de lectura para 20 muestras, las condiciones de operación son al vacío ( $20\mu\text{mHg}$ ), atmósfera de nitrógeno de alta pureza (99:995%) y un voltaje en el tubo fotomultiplicador de 894V.

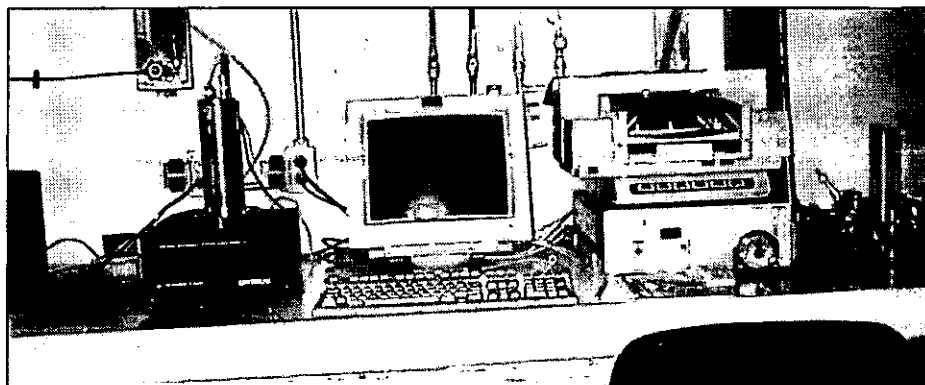


Figura 13: lector de termoluminiscencia DAYBREAK 1100 AUTOMATED TL SYSTEM (izquierda), computadora y graficadora acoplada al lector (derecha).

◆ Irradiador DAYBREAK 801 MULTIPLE SAMPLE IRRADIATOR (figura 14), con carrusel para irradiado consecutivo de 20 muestras, a su vez, el irradiador cuenta con las siguientes fuentes:

Estroncio 90 ( $^{90}\text{Sr}$ )      Actividad:                    100 mCi  
                                   Numero atómico:            38  
                                   Peso atómico:              87.62 (promedio general de todos los isótopos del Sr)  
                                   Vida media:                28.6 años  
                                   Decaimiento a:    Itrio 90 ( $^{90}\text{Y}$ )  
 Emisiones: beta ( $\beta$ )    1- Energía máxima: 0.546000 MeV, Energía promedio: 0.195800 MeV

Curio 244 ( $^{244}\text{Cm}$ )      Actividad:                    500 $\mu$ Ci  
                                   Numero atómico:            96  
                                   Peso atómico:              245 (promedio general de todos los isótopos del Cm)  
                                   Vida media:                18.11 años  
                                   Decaimiento a:    Plutonio 240 ( $^{240}\text{Pu}$ )  
 Emisiones: alfa ( $\alpha$ )    1- 5.7628 MeV, Electrones (e) 1- 0.01430 MeV, Gamma ( $\gamma$ ) 1- 0.01030 MeV  
                                   2- 5.8050 MeV                                2- 0.05687 MeV                                2- 0.19727 MeV  
                                   3- 5.6330 MeV                                3- 0.03689 MeV

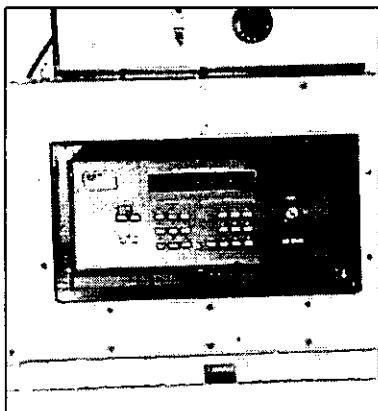


Figura 14: irradiador DAYBREAK 801 MULTIPLE SAMPLE IRRADIATOR cubierto por un blindaje de plomo.

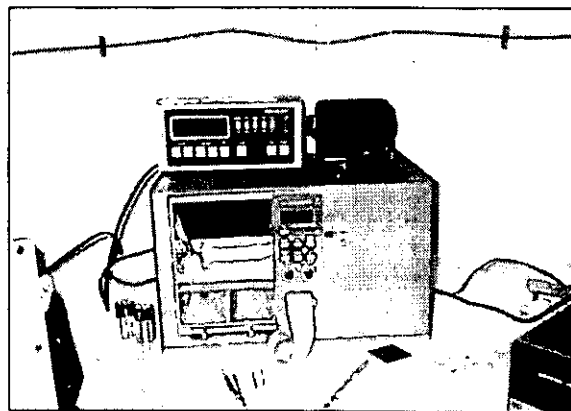


Figura 15: contador de partículas alfa DAYBREAK ALPHA COUNTER 583.



- ◆ Contador de partículas alfa DAYBREAK ALPHA COUNTER 583 (figura 15), con capacidad para 3 tubos fotomultiplicadores, detecta la emisión de partículas alfa provenientes de una muestra, indicando el número de emisiones por unidad de tiempo (conteos/Ks).
- ◆ Espectrómetro gamma portátil GEOFYZIKA BRNO PORTABLE GAMMA RAY SPECTROMETER GS-512 (figura 16), con detector de NaI(Tl), este equipo de detección in situ en el lugar de muestreo detecta las energías y la intensidad de las emisiones gamma identificando el radioisótopo emisor ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  para TL).

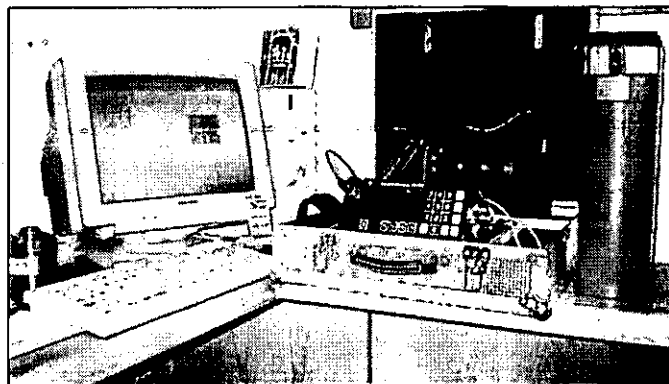


Figura 16: espectrómetro gamma portátil GEOFYZIKA BRNO PORTABLE GAMMA RAY SPECTROMETER GS-512.



Figura 17: vista general del laboratorio de termoluminiscencia.

- ◆ contador Geiger HARSHAW-BICRON PORTABLE COUNT-RATE METER MODEL SURVEYOR M, con GM Probe, para su uso en detección y medición de radiación ionizante gamma, beta y alfas de altas energías.

### 3.2 Colaboraciones

El laboratorio de TL cuenta con el apoyo de la infraestructura del Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) del IGEF, en el cual se hace uso de los microscopios, binoculares, balanzas, molinos y ultrasonidos entre otros equipos y que son utilizados durante el proceso de preparación de las muestras figura 11 y 12.

La participación del Laboratorio de Desarrollo de Dosímetros del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares esta dedicada a la fabricación y lectura de los dosímetros TL para medición de la dosis gamma y cósmica, operando el equipo lector de termoluminiscencia HARSHAW TL SYSTEM 4000, Así mismo el ININ facilita el microscopio de barrido electrónico PHILLIPS XL30 para determinación del porcentaje de K en la muestra, la determinación de la concentración de U y Th se realiza por medio de la técnica de activación neutrónica en el reactor

nuclear TRIGA MARK III del mismo instituto. Se tiene además la colaboración del microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 35c, con equipo de microanálisis de energía dispersiva (EDX) marca Tracor-Noran, del Instituto de Geología de la UNAM. El Laboratorio de Química Analítica del IGEF UNAM colabora con las determinaciones de K por medio de la espectrometría de absorción atómica.

### 3.3 Licencias de Operación

Por ser este un laboratorio que hace uso de fuentes radiactivas, fue necesario tramitar ante la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) el permiso correspondiente para el manejo y uso de fuentes. Este organismo es el encargado en México de regular y otorgar dichos permisos. Entre los requisitos cubiertos por el laboratorio y que exige la CNSNS se encuentran: el monitoreo radiológico permanente del personal, la capacitación y actualización del personal a cargo del laboratorio en materia de protección radiológica, pruebas de fuga en los equipos y los exámenes médicos del personal ocupacionalmente expuesto.

### 3.4 Localización y Personal Responsable

El laboratorio de termoluminiscencia se encuentra actualmente ubicado en la planta baja y primer piso del edificio anexo del Instituto de Geofísica UNAM dentro de Ciudad Universitaria, el personal que se desempeña dentro de este laboratorio a continuación se menciona:



Responsable del laboratorio:  
Dr. Peter Schaaf  
Doctor en Geología  
Universidad de Munich, Alemania 1991



Técnico a cargo del laboratorio:  
Ing. Angel Ramirez Luna  
Ingeniero Químico  
Universidad Veracruzana 1995

## 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 4.1 Desarrollo Experimental

Como es mencionado en capítulos anteriores el fechamiento por TL se aplica a un buen número de muestras y la técnica de fechamiento empleada para cada tipo de muestra difiere según el contexto de interés, por otro lado la preparación misma de la muestra varía de acuerdo a la forma física y composición mineralógica, a continuación se mencionarán algunos aspectos relevantes durante el proceso de fechamiento.

Cabe destacar que a través de la práctica que sea adquirido en el manejo de las diferentes clases de muestras, se han depurado las técnicas de fechamiento y que comprenden desde la toma de las muestras en campo hasta el análisis e interpretación de los resultados en el laboratorio.

#### 4.1.1 Viabilidad de fechamiento.

Antes de iniciar cualquier actividad respecto al fechamiento por TL es fundamental discutir y planear junto con los investigadores las actividades involucradas para llevar a cabo el fechamiento, de manera que se estime la viabilidad de dicho proyecto, para ello, entre los principales puntos que se deben acordar durante esta reunión se encuentran:

- A. Problemática a resolver con el fechamiento.
- B. Definición del evento a fechar y tipo de muestra.
- C. Edad estimada dentro del rango de fechamiento por TL.
- D. Tipos de minerales presentes en las muestras y su porcentaje.
- E. Breve explicación del método, sus características y requerimientos.
- F. Establecimiento del tipo de colaboración.
- G. Plan de actividades.

#### 4.1.2 Toma de muestras en campo.

Siempre es recomendable asistir al sitio de interés junto con el investigador que requiere del fechamiento y minimizar con esto el riesgo de incurrir en un error al momento de la toma de las muestras para evitar una segunda recolección, especialmente cuando el acceso al sitio es complicado o retirado, además se minimiza la generación de gastos extras.

#### Muestras geológicas:

En este tipo de muestra, primero se tiene que conocer el estado en el que se encuentra en su forma natural y posteriormente definir la técnica de muestreo, si por ejemplo la muestra a fechar es un derrame (flujo de lava) se corta un bloque con la previa eliminación del material expuesto al intemperismo, si por el contrario la muestra es de una duna o sedimento, la toma generalmente se realiza insertando un tubo y una vez que este es extraído, en su interior trae consigo la muestra, otras consideraciones son necesarias en algunos casos, tal como el acudir al sitio de muestreo por la noche evitando la interacción de los rayos solares con la muestra.

#### Muestras arqueológicas:

Generalmente la toma de la muestra se realiza cuando se está llevando a cabo una excavación en el sitio de interés, habitualmente se recogen pequeños fragmentos de cerámica conocidos como tepalcates, los cuales se envuelven con papel aluminio y se guardan dentro de bolsas negras, de esa manera se asegura que la muestra no haya sido expuesta a condiciones que alteren las características del fenómeno TL para fines de fechamiento, además, estos fragmentos deben considerarse representativos del sitio de excavación. En el lugar de muestreo también se toma una muestra del suelo que rodea a la cerámica para la determinación de los radioisótopos presentes en el medio.

#### 4.1.3 Medición de la tasa de dosis anual gamma y cósmica.

En el sitio de muestreo y en forma mas precisa en el lugar que ocupaba la muestra que se tomó, se colocan dosímetros TL de  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Dy}$  con el fin de medir la tasa dosis anual de radiación gamma y cósmica (dosis que forman parte de la tasa de dosis anual, ver capítulo 2), dichos dosímetros permanecen por lo menos tres meses en el lugar, al termino de este periodo de exposición los dosímetros son recogidos y llevados a un equipo lector de termoluminiscencia HARSHAW 4000 donde son leídos e interpretados. Este procedimiento es generalmente el que se ha venido realizando, a excepción que en ocasiones es necesario sobre todo para el caso de muestras geológicas tomar un bloque de 30 cm de radio (esta dimensión obedece a los principios de interacción de las radiaciones con la materia) el cual es llevado al laboratorio y donde es colocado en el centro del bloque el dosímetro, simulando con esto su entorno natural. En el momento de la redacción de este informe, se esta llevando a cabo la calibración de un equipo de reciente adquisición, un espectrómetro gamma portátil el cual sustituirá el algunos casos a los dosímetros TL, ofreciendo mas facilidades técnicas como evitar el regreso al sitio de muestreo además de tiempos mas cortos de exposición y por consiguiente de la obtención de los resultados.

#### 4.1.4 Análisis petrográfico.

Una vez que se tiene la muestra en el laboratorio se realiza un análisis previo para identificar y cuantificar los minerales que la componen, si la muestra es de origen geológico se cuenta ya con los criterios para definir el mineral a fechar, el cual posteriormente se separa de los demás minerales concentrándolo hasta un 98% de pureza aproximadamente, de los minerales que presentan un espectro TL optimo y caracterizado se encuentran el cuarzo, los vidrios y las plagioclasas. Para llevar a cabo este análisis se emplea la identificación visual con un binocular estereoscópico y tiñendo los minerales, si el caso lo amerita la identificación de minerales se realiza con ayuda de un microscopio de barrido electrónico. Las muestras arqueológicas son analizadas en un microscopio petrográfico de laminas delgadas, y al igual que en las muestras geológicas se identifica y cuantifica los minerales que forman el barro con el que esta hecho la pieza, solo que las muestras arqueológicas se trabajan como muestra total, es decir no hay separación de minerales ya que generalmente son solo pequeños fragmentos con los que se trabaja, basándose en la experiencia con muestras ya procesadas cuando una muestra arqueológica presenta alto contenido de carbonatos, óxidos o compuestos de fierro el espectro TL tiene un comportamiento anómalo y no es apto para el fechamiento. así mismo el análisis petrográfico es de mucha ayuda al entendimiento del comportamiento del fenómeno TL en una muestra.

#### 4.1.5 Separación de minerales y preparación de la muestra.

Distintos son los procesos de preparación a los que es sometida una muestra geológica para su fechamiento por TL, al contrario de una muestra arqueológica la cual cuenta con una técnica de preparación definida, esto es debido a la diferencia en las características que presentan las muestras geológicas como se ha mencionado anteriormente, por lo que es necesario planear cuales procesos de separación se deberán de emplear para llegar a alcanzar el requerimiento del 98 % de pureza en un mineral en especial. Se trabaja en condiciones de oscuridad dentro del laboratorio, la luz que se utiliza para poder trabajar en una luz roja filtrada con una longitud de onda que no interfiere con el fenómeno TL.

Entre los principales pasos a seguir durante la separación y preparación se encuentra la trituración o molido de la muestra utilizando molinos y trituradoras los cuales fragmentan la muestra hasta obtener una tamaño apropiado para su manejo, aproximadamente entre 200 y 300  $\mu\text{m}$ ; separación magnética con un equipo Frantz el cual genera un campo magnético que separa los minerales aprovechando las diferentes susceptibilidades magnéticas de estos; líquidos pesados, la diferencia de densidades de los minerales provocan una separación (sea por sedimentación o por flotación) al someterlos a un medio con densidad conocida, de manera tal

que la densidad del medio se encuentre en las inmediaciones de las densidades de los minerales a separar, se preparan soluciones de agua salada ( $H_2O+NaCl$ ), politungstato de sodio ( $Na_6O_{39}W_{12}\cdot H_2O$ ), Tribromometano ( $CHBr_3$ ) como medios de separación dependiendo de la densidad buscada; para observar que los procesos de separación se estén llevando correctamente, los minerales son teñidos con químicos que son afines a un tipo de mineral en particular dándoles una coloración específica, por ejemplo, el ácido rodizónico ( $C_6Na_2O_6$ ) le proporciona una coloración roja a las plagioclasas; algunas muestras son corroídas con ácido fluorhídrico (HF) concentrado eliminando aproximadamente  $10\ \mu m$  de la superficie de la muestra la cual ha sido expuesta a condiciones que interfieren con el fechamiento por TL; molido y tamizado, este paso se realiza moliendo la muestra con un mortero ágata y tamizándola con mallas hasta obtener la fracción de tamaño entre  $105$  y  $125\ \mu m$ ; finalmente son colocados  $3\ mg$  de la muestra en discos de acero inoxidable (planchetas).

#### 4.1.6 Determinación de la paleodosis y técnica de irradiado.

Prueba de preirradiado: antes de efectuar el método aditivo, el cual consta de irradiar las muestras naturales a cuatro diferentes dosis de radiación beta, es necesario estimar la dosis natural, ya que las dosis aditivas estarán en función de esta, para ello se realiza una irradiación arbitraria (que es ya conocida dependiendo si la muestra es de origen arqueológico o geológico) sobre una plancheta natural (muestra que no se haya irradiado artificialmente) tomándose su respectiva lectura TL, al mismo tiempo es tomada la lectura de una plancheta natural sin irradiar y se comparan las intensidades calculando una razón de intensidad TL por unidad de dosis dada, de manera que con esto se pueda tener una aproximación de la dosis natural de la muestra.

Dosis equivalente (Q): Para calcular la dosis equivalente Q es empleado el método aditivo (figura 19) que consta de irradiar las muestras naturales a cuatro diferentes dosis beta, previa prueba de preirradiado, de manera tal que si la dosis natural calculada fuera igual a  $5\ Gy$  (Gy es la unidad de dosis llamada Gray donde  $1Gy = 1\ Joule / Kg.$ ), la primera, segunda tercera y cuarta dosis artificial será de  $5, 10, 15$  y  $20\ Gy$  respectivamente, dejando un tiempo entre el irradiado y la lectura de las muestras para permitir que se establezcan las trampas implicadas en el proceso de interacción con la radiación. A partir de los datos obtenidos a una temperatura determinada por la presencia de picos TL de interés (estos picos se encuentran generalmente a temperaturas entre  $250$  y  $450\ ^\circ C$ ) es elaborada una regresión lineal para calcular el valor de la dosis equivalente graficando intensidad TL contra dosis (figura 20) en donde la intersección de la regresión lineal con el eje de las abscisas es el valor de la dosis equivalente Q.

Prueba de la meseta: las temperaturas de evaluación tanto de la dosis equivalente como del factor por supralinealidad están fijadas por la presencia de picos en la señal TL natural y artificial bien definidos y a temperaturas por arriba de los  $200\ ^\circ C$ , sin embargo, aún cuando estos picos indican la probable inalterabilidad de las trampas a través del paso del tiempo es necesario corroborar este hecho realizando la prueba de la meseta (figura 21), esta prueba se realiza con las lecturas TL obtenidas en el método aditivo graficando el factor (TL natural / TL natural + dosis artificial beta) contra temperatura.

Factor por supralinealidad (I): para calcular este factor son irradiadas muestras naturales a las mismas dosis que en el método aditivo, estas muestras no deberán haber sido irradiadas anteriormente y deberán haber sido leídas, es decir, sin señal TL almacenada, posteriormente se elabora una regresión lineal con los datos obtenidos y de la misma manera que se calculo la dosis equivalente, la intersección de la línea de regresión con el eje de las abscisas es el valor del factor por supralinealidad (figura 22), a este método se le denomina método regenerativo.

Paleodosis: una vez calculada la dosis equivalente Q y el factor por supralinealidad I la paleodosis es el resultado de sumar ambos valores, valor cuyas unidades resultaran en Gy o mGy.

Prueba de la meseta en el blanqueo parcial: para el caso de muestras geológicas en donde se va a fechar la última exposición a la luz solar, la paleodosis estará representada por el valor obtenido por la prueba de la meseta, surgida del blanqueo parcial de las muestras por efecto de la luz solar más el factor por supralinealidad, dicha prueba consiste en exponer a la luz solar planchetas naturales a diferentes intervalos de tiempo que pueden ir desde pocos minutos hasta varias horas, enseguida se toman sus lecturas obteniendo las intensidades TL correspondientes, estas intensidades son extrapoladas en una regresión lineal compuesta por el método aditivo en un rango de 200 a 500 °C (intensidad contra dosis, figura 26) graficando la dosis resultante de cada tiempo de exposición contra la temperatura de evaluación (figura 27), para cada intervalo de exposición corresponderán una serie de valores los cuales estarán formando una línea, dentro de esta serie de líneas la que muestre una meseta nos dará el valor de la dosis equivalente.

#### 4.1.7 Determinación de la tasa de dosis anual.

Esta tasa de dosis es calculada a partir de la concentración de los radioisótopos  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  presentes en la muestra y suelo, así como de la dosis gamma y cósmica (ver apartado 4.1.3). El uranio tiene una contribución de radiación  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ , el torio contribuye con radiación  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ , y en el caso del K solo contribuye con radiación  $\beta$  y  $\gamma$ , conociendo la concentración de estos elementos es posible estimar la dosis que emiten en un intervalo de tiempo medido en mGy/año o Gy/año. Para determinar la concentración de estos radioisótopos son empleados diferentes métodos, para determinar la concentración en partes por millón (ppm) de  $^{238}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$  comúnmente se utilizan los métodos de activación neutrónica realizada en el reactor nuclear del ININ o en el contador de partículas alfa del propio laboratorio, para determinar el porcentaje de  $^{40}\text{K}$  se utiliza el microscopio de barrido electrónico (ININ) o el equipo de absorción atómica del Departamento de Química Analítica del IGEF UNAM.

Es también necesario para calcular la tasa de dosis anual contemplar la humedad contenida en las muestras, ya que esta humedad absorbe parte de la radiación  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ , que interaccionaría con la muestra, el porcentaje de humedad de la muestra se estima en función de las diferencias entre los pesos seco y de saturación de humedad.

#### 4.1.8 Determinación del factor de eficiencia alfa/beta (factor k).

En términos de energía depositada podemos decir que la energía depositada por partículas alfa es mayor que la energía depositada por partículas beta (en las mismas condiciones dadas en la irradiación como el espesor de la muestra y arreglo geométrico con la fuente) la proporción entre la radiación alfa y beta es estimada por medio del valor k, durante el cálculo de la paleodosis las muestras fueron irradiadas con una fuente beta de  $^{90}\text{Sr}$  por lo que es necesario contemplar este factor y para calcularlo es empleado el mismo método aditivo y a las mismas dosis que cuando se calculo la dosis equivalente Q que para este caso la llamaremos  $Q_\beta$  por haber sido calculado con betas, de tal modo que se deberá obtener un valor de dosis equivalente  $Q_\alpha$  para el caso de alfas, la irradiación se realiza con una fuente alfa de  $^{244}\text{Cm}$ . Esta relación esta dada por la ecuación  $k = Q_\beta / Q_\alpha$  generalmente este factor oscila entre 0.1 y 0.20 según las características de cada muestra, una vez obtenido este factor deberá ser insertado en la ecuación para calcular la edad de la muestra (llamándosele eficiencia alfa) afectando el valor estimado de la dosis alfa. Por otro lado la misma dosis beta tiene un factor de eficiencia con respecto a la interacción que tiene este tipo de radiación con la materia, este factor es de 0.90 siendo ya un valor establecido, la dosis gamma y cósmica son directas, sin factores, ya que el poder de penetración de las mismas es alto lo que asegura un factor de 1.0, de manera que al estimar la tasa de dosis anual recibida por los radioisótopos  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  los valores quedan sin modificación.

## 4.2 Ejemplos de Fechamiento

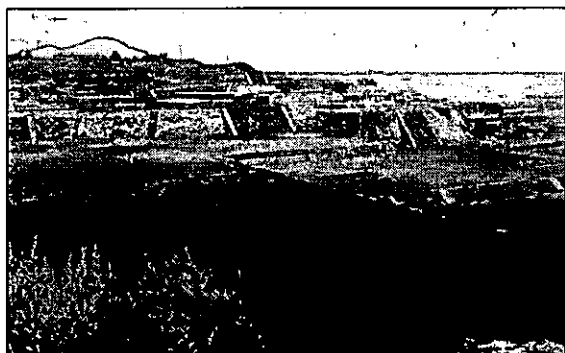
### 4.2.1 Fechamiento arqueológico.

Sitio: *Teotenango, Estado de México.*

Tipo de muestra: *Cerámica fragmento, código T6, (Proyecto de investigación del Arqueólogo Martín A. Mondragón).*

Técnica empleada: *Técnica de grano fino (4–11  $\mu\text{m}$ ).*

Contexto: La zona arqueológica de Teotenango se encuentra ubicada en el municipio de Tenango del Valle, a 25 km. de la ciudad de Toluca, sobre el cerro Tetépetl el cual tiene una altura promedio de 2700 msnm. ocupa cerca de 400 Ha de la meseta del cerro, la ciudad fue construida a base de plataformas a distintos niveles contenidas por distintas técnicas constructivas como taludes, muros, cornisas, etc. Las evidencias prehispánicas encontradas en este sitio arqueológico denotan 5 periodos: Teotihuacana (1 Agua Rawi Tawi 650 – 750 d.C.), Teotenaca (2 Tierra Tenowi Hani 750 – 900 d.C.), Matlazinca (3 viento, Roxu Hupi 900 – 1162 d.C.), Chichimeca-matlazinca ( 4 fuego, Rukunhowi Chhuta'a 1162 – 1250 d.C.), Mexicas (5 muerte Rokuta Tuwi 1474 – 1550), este ultimo periodo termina con la fundación de la villa de Tenango del Valle por los españoles, en la parte baja del cerro Tetépetl. En este estudio se extrajeron, cerámicas encontradas en entierros en la parte norte de Teotenango a las que se le aplico el método de termoluminiscencia para su fechamiento y con ello seguir con el establecimiento de la historia ocupacional establecida en el sitio.



(a)



(b)

Figura 18: (a) vista parcial de Teotenango y (b) vista de la excavación de una tumba con ofrendas

Muestreo de campo: la toma de las muestras se realizó durante la excavación de un entierro encontrándose una variedad de fragmentos de cerámica, se seleccionaron 6 fragmentos (tepalcates), por su tipología los fragmentos correspondían a diferentes periodos de ocupación de Teotenango, también se tomó una porción del suelo donde se extrajo la cerámica el cual es utilizado para la determinación de los radioisótopos ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$ ) presentes en el medio, en el mismo sitio de muestreo se colocaron dosímetros TL de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  para medir la dosis gamma y cósmica, los cuales fueron recolectados 4 meses después.

Análisis petrográfico y separación de minerales: en este caso no se realizó el análisis petrográfico previo, ya que se tiene información de la composición de las cerámicas del sitio, tampoco se realizó la separación de minerales ya que este tipo de muestra se trabaja con la muestra total.

Preparación de la muestra: el fragmento de cerámica es descortezado aproximadamente 4 mm en toda su superficie, posteriormente el fragmento es molido con un mortero de ágata hasta hacerlo un polvo muy fino, una vez hecho esto, la materia orgánica que contiene la muestra es digerida con peróxido de hidrogeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), seguida de una serie de lavados con agua

desionizada, se debe eliminar los carbonatos que contenga la muestra ya que inhiben el fenómeno de TL y para esto se somete la muestra a neutralización con ácido clorhídrico (HCl) observándose los cambios de pH en la muestra, seguido nuevamente de una serie de lavados con agua desionizada. La muestra es separada por sedimentación a diferentes intervalos de tiempo y utilizando como medio precipitante acetona ( $\text{CH}_3\text{-CO-CH}_3$ ) en este paso es seleccionando solo la fracción en el tamaño de grano de 4 a 11  $\mu\text{m}$  (técnica de grano fino), finalmente se depositan 2 miligramos de muestra en un disco de aluminio de 9 mm de diámetro y 0.5 mm de espesor.

Determinación de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  en cerámica y suelo: una porción de la muestra hasta antes de ser digerida es apartada y junto con la muestra de suelo son analizadas para determinar la concentración de los radioisótopos y con ello estimar la tasa de dosis anual a la que esta sometida la muestra en campo, las técnicas utilizadas para la determinación de estos elementos son, para la determinación del  $^{238}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$  el método de activación neutrónica realizado en el reactor nuclear TRIGA MARK III, para el  $^{40}\text{K}$  el método de microscopio de barrido electrónico realizado el equipo PHILLIPS XL30 ambos equipos pertenecientes al ININ.

Selección del filtro: el juego de filtros empleados para la cerámica fueron el SCHOTT BG-39 junto con el filtro CORNING 7-59.

Determinación de la paleodosis: La dosis equivalente Q obtenida para la muestra T6 a partir del método aditivo y la extrapolación en la regresión lineal (figuras 19 y 20) fue de 2.8240 Gy para un rango de temperaturas de los 310 a los 330°C, en la prueba de la meseta (figura 21) se puede observar la formación de una meseta asociada a los picos TL definidos para el mismo rango de temperaturas. El factor por supralinealidad I obtenido para este mismo rango de temperaturas (figura 22) fue de 0.2930 Gy.

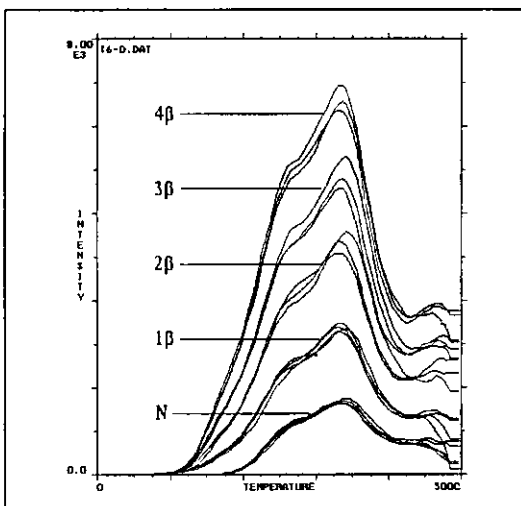


Figura 19: curvas termoluminiscentes del método aditivo, se puede observar la presencia de picos TL definidos de los 310 a los 330 °C tanto en la señal natural (N) como en las irradiadas artificialmente (N+β).

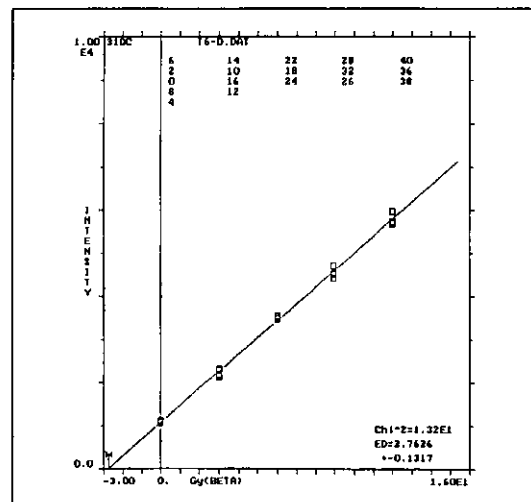


Figura 20: método aditivo, donde es determinada por extrapolación la dosis equivalente Q.



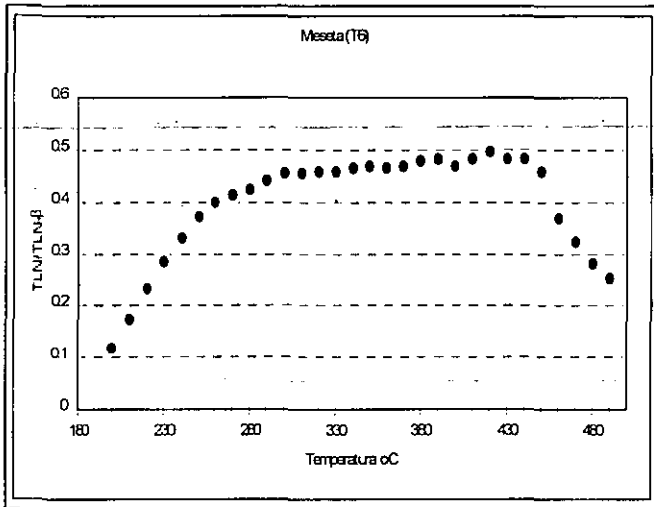


Figura 21: prueba de la meseta.

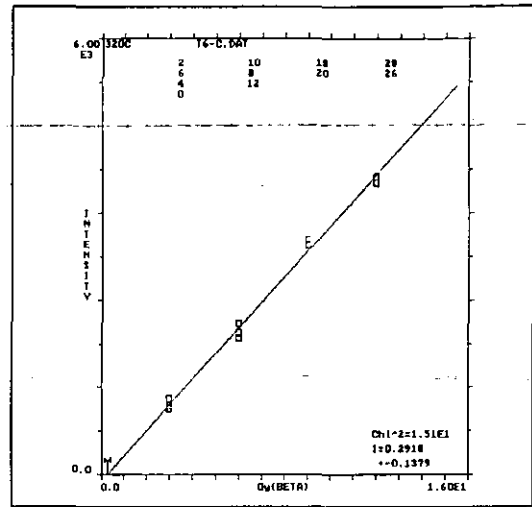


Figura 22: método regenerativo, determinación por extrapolación del factor por supralinealidad I.

Finalmente al sumar la dosis equivalente Q y el factor por supralinealidad I obtenemos una paleodosis  $P = 3.1170 \text{ Gy}$ .

Determinación de la tasa de dosis anual: una vez conocidas las concentraciones de los radioisótopos  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  presentes en muestra y suelo, es posible calcular las dosis alfa, beta y gamma provenientes de estos elementos en un intervalo de tiempo, que generalmente es en años. Las dosis calculadas fueron:

$$D_{\alpha} = 1.2055 \text{ mGy/a}$$

$$D_{\beta} = 0.9049 \text{ mGy/a}$$

$$D_{\gamma} = 1.0960 \text{ mGy/a}$$

Obteniéndose así una tasa de dosis anual =  $3.2064 \times 10^{-3} \text{ Gy/a}$

Las dosis alfa, beta y gamma fueron modificadas por el efecto de absorción causado por la humedad, además también fueron contemplados el factor k (eficiencia alfa/beta) y el factor de eficiencia beta ( $Ef_{\beta} = 0.90$ ). La contribución cósmica y gamma para este caso fue determinada por la dosimetría TL medida en campo.

Calculo de la edad: una vez considerado todos los elementos que intervienen en la ecuación de la edad por TL, sustituimos los valores obteniendo:

$$\text{Edad}_{T_6} = \frac{\text{Paleodosis (Gy)}}{\text{Tasa de dosis anual (Gy/a)}} = \frac{3.1170 \text{ Gy}}{3.2064 \times 10^{-3} \text{ Gy/a}} = 972 \pm 68 \text{ años}$$

La desviación en la edad es calculada a partir de las desviaciones tanto de los componentes que conforman la paleodosis como de la tasa de dosis anual.

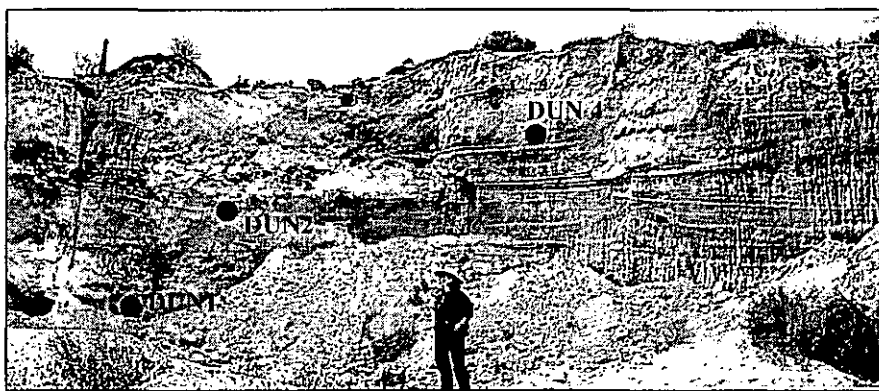
#### 4.2.2 Fechamiento geológico.

Sitio: *Playa San Bartolo, Sonora.*

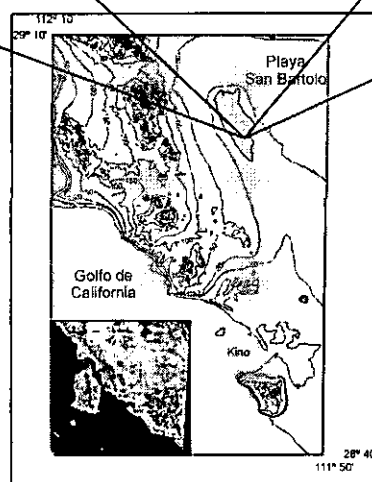
Tipo de muestra: *Paleodunas, código DUN1 (Proyecto de investigación de la Dra. Beatriz Ortega)*

Técnicas empleadas: *técnica de grano grueso (muestra geológica 105 – 125  $\mu\text{m}$ ) y técnica de blanqueo parcial (para determinación de la última exposición a la luz solar).*

Contexto: La Playa San Bartolo, 25 km. al N de bahía Kino, es el paleolago más extenso de Sonora. Su cuenca contiene sedimentos fluviales y lacustres de edad Pleistoceno tardío. Actualmente su superficie está limitada en el borde oriental por un cordón de dunas de 13 km. de longitud, y de 0.5 a 1.5 km. de ancho y con alturas que varían entre 25 y 40 m. Localmente presenta desarrollo de *badlands*, y en la parte central está disectado por el río Bacoachi, un arroyo tipo *wadi* que desemboca en la playa. Estos depósitos presentan una estructura compleja, con intercalaciones de facies eólicas y fluviales. Las edades de la formación de las paleodunas constituyen una información importante para establecer la edad mínima de las actuales condiciones áridas en esta región. Los resultados preliminares de fechamientos por TL son de tres núcleos de diferentes niveles colectados y que pertenecen a un corte donde están expuestos los 5 m. superiores del cordón de dunas. La técnica empleada para el fechamiento de estas dunas por TL fue la de blanqueo parcial conocida como *Partial Bleaching Technique* (Mejdahl, 1988), ya que se va a determinar la edad de la formación de las dunas tomando como referencia su última exposición a la luz solar.



(b)



(a)

Figura 23: (a) Mapa de localización de la Playa San Bartolo, costa de Sonora. (b) Corte en el río Bacoachi en el que se encuentran expuestos los 5 m superiores del cordón de dunas de la Playa San Bartolo, los puntos en rojo representan los sitios precisos de extracción de las muestras.

**Muestreo de campo:** la toma de las muestras se realizó introduciendo un tubo galvanizado de 2" de diámetro en la pared del corte, con especial cuidado para que los minerales no fueran expuestos a la luz solar, con el fin de evitar la pérdida de la señal termoluminiscente. En el mismo sitio de muestreo se colocaron dosímetros TL de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  para medir la dosis gamma y cósmica, los cuales fueron recolectados un año después.

**Análisis petrográfico:** el fin de identificar los minerales que forman la muestra es seleccionar el mineral óptimo para el fechamiento por TL, en esta muestra se observó que las arenas que forman estas dunas están compuestas principalmente por cuarzo, feldespatos, y minerales ferromagnesianos con un contenido de  $\text{SiO}_2$  entre 65 y 68 % en peso, procedentes de rocas graníticas, con esta información fue seleccionada el cuarzo como el mineral de interés el cual posteriormente se deberá concentrar.

**Separación de minerales:** en este proceso de separación fue utilizada la separación magnética con amperajes desde 0.5 hasta 1.5 amperes y a diferentes ángulos de inclinación, en la separación por líquidos pesados el politungstato de sodio se maneja a densidades de 1.59 y 1.62  $\text{gr/cm}^3$ , para la eliminación de las plagioclasas remanentes así como el descortezado de los cuarzos la muestra fue sometida a corrosión con ácido fluorhídrico (HF) concentrado en baño de ultrasonido, finalmente se alcanzó una pureza del 98% de cuarzo requerido para esta técnica.

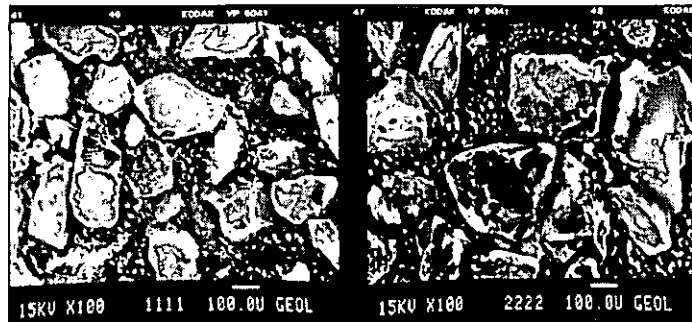


Figura 24: imágenes del microscopio de barrido electrónico, en donde se verifica la pureza de cuarzos (98%) en las muestras después del proceso de separación.

**Preparación de la muestra:** una vez concentrado el cuarzo a un 98% de pureza se procede a la preparación de la muestra consistente en colocar 3mg de muestra sobre un disco de acero inoxidable (plancheta) de 10 mm de diámetro y 0.5 mm de espesor, se fabrican aproximadamente 60 planchetas para realizar el fechamiento.

**Selección del filtro:** Para un buen análisis del espectro termoluminiscente es necesario emplear un juego de filtros acorde a las características termoluminiscentes del material a estudiar (ver capítulo 2) para los cuarzos de esta muestra el juego de filtros empleados fueron el HOYA U-340 junto con el filtro CORNING 7-59.

#### Determinación de la paleodosis

Para esta técnica en particular (blanqueo parcial) donde se va a calcular el tiempo transcurrido desde la última vez que los cuarzos fueron expuestos a la luz solar, es decir, desde la formación de las dunas, la dosis equivalente (Q) es determinada a partir de la prueba de la meseta (figura 27) basada en el método aditivo (figura 26), el factor por supralinealidad (I) a partir del método regenerativo (figura 28). La dosis equivalente Q obtenida para la muestra DUN1 fue de 3.081 Gy para un rango de temperaturas de los 320 a los 350°C. El factor por supralinealidad (I) obtenido para este mismo rango de temperaturas fue de 1.789 Gy.

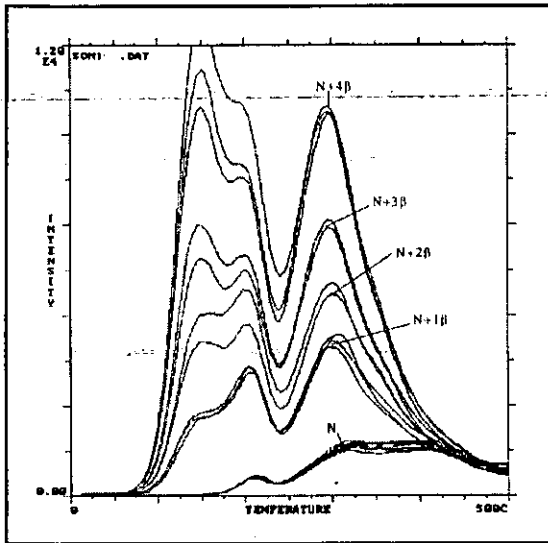


Figura 25: curvas termoluminiscentes del método aditivo, la letra N representa la señal TL natural de la muestra, la letra β la dosis beta artificial dada a la muestra.

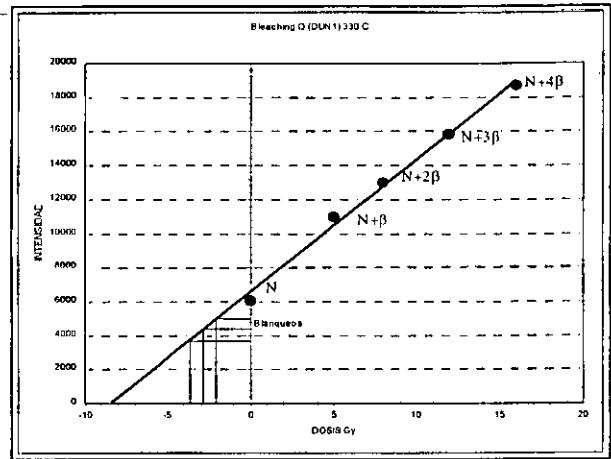


Figura 26: determinación de la dosis equivalente a partir del método aditivo a 330°C, en ella se extrapola la señal TL remanente después del blanqueo parcial.

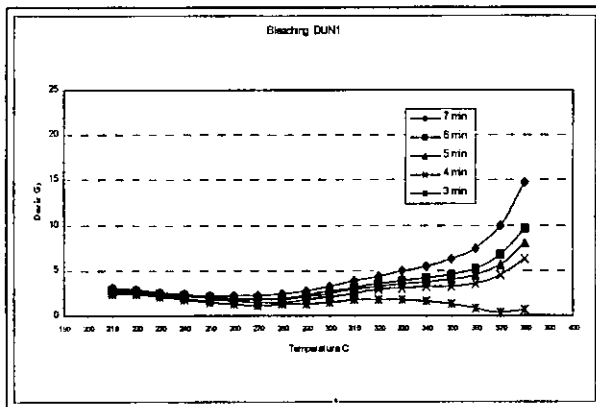


Figura 27: determinación de la dosis equivalente (Q) en la prueba de la meseta.

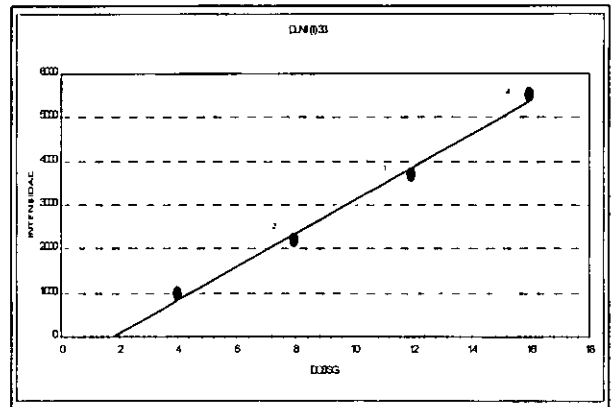


Figura 28: determinación del factor por supra-linealidad (I) en el método regenerativo.

De manera que al sumar la dosis equivalente (Q) y el factor por supra-linealidad (I) obtenemos una paleodosis  $P = 4.870 \text{ Gy}$ .

Determinación de la tasa de dosis anual: una vez conocidas las concentraciones de los radioisótopos  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  presentes en muestra (la muestra y su entorno es lo mismo), es posible calcular las dosis beta y gamma, obteniéndose así una tasa de dosis anual  $= 3.42 \times 10^{-3} \text{ Gy/año}$

La dosis alfa no se contempla en este caso, la corrosión con HF elimina los efectos causados por esta radiación sobre la muestra.

Las dosis beta y gamma fueron modificadas por el efecto de absorción causado por la humedad, además también fueron contemplados el factor k (eficiencia alfa/beta) y el factor de eficiencia beta ( $Ef_{\beta} = 0.90$ ). La contribución cósmica y gamma para este caso fue determinada por la dosimetría TLD medida en campo.

Calculo de la edad: una vez considerado todos los elementos que intervienen en la ecuación de la edad por TL, sustituimos los valores obteniendo:

$$\text{Edad}_{\text{DUN1}} = \frac{\text{Paleodosis (Gy)}}{\text{Tasa de dosis anual (Gy/a)}} = \frac{4.870 \text{ Gy}}{3.420 \times 10^{-3} \text{ Gy/a}} = 1423 \pm 86 \text{ años}$$

La desviación en la edad es calculada a partir de las desviaciones tanto de los componentes que conforman la paleodosis como de la tasa de dosis anual.

Fueron también fechadas dos muestras mas con el mismo procedimiento, las muestras DUN2 y DUN4 obteniendo una secuencia cronológica.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Proyectos

El laboratorio de termoluminiscencia ha tenido una activa participación en diversos proyectos de investigación en áreas y disciplinas diversas, y su aportación ha sido fundamental para llevar a cabo los trabajos de investigación, a continuación se mencionan algunos de estos proyectos:

- *Teotihuacan en el tiempo* (IN 307398), Instituto de Investigaciones Antropológicas UNAM.
- *Dinámicas cifradas en sistemas biológicos: el tránsito de secuencias a mecanismos* (IN 116198), Centro de Ciencias Físicas UNAM.
- *Efecto de perturbaciones y catástrofes en sistemas naturales: el caso del vulcanismo y el clima de los sedimentos lacustres diatomíferos de la Faja Volcánica Mexicana* (IN203094), Instituto de Física UNAM.
- *Chichen Itza 800-1200* (Tesis Doctorado), Facultad de Filosofía y Letras UNAM
- *Magnetismo ambiental de sedimentos en paleolagos en Sonora y Baja California*, Instituto de Geofísica UNAM.
- Elaboración de mapas de riesgo volcánico basados en sistemas de información geográfica. Caso Volcán Nevado de Toluca (Tesis Doctorado), Instituto de Geofísica UNAM.
- *Asentamientos humanos en la zona de Hervideros Durango* (Tesis Licenciatura), Escuela Nacional de Antropología e Historia.
- *Fechamientos arqueológicos por termoluminiscencia* (CONACYT 13290-H), Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.
- *Aplicación de una nueva metodología para el estudio de material cerámico: caracterización, uso de recursos e intercambio. El caso de Oaxaca Prehispánica* (CONACYT G30704-H) Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- *Pruebas de autenticidad en piezas arqueológicas*, Museo Nacional de Antropología.
- *Paleosuelos como indicadores de cambio ambiental en zonas volcánicas del centro de México* (CONACYT 32337-T), Instituto de Geología UNAM.
- *Fechamientos por termoluminiscencia de eventos climáticos y ambientales de secuencias continentales cuaternarias de México* (IN106999), Instituto de Geofísica UNAM.

### 5.2 Publicaciones

La publicación de artículos ha presentado resultados de interés para la comunidad científica en revistas especializadas, cabe señalar que algunos artículos aun se encuentran en proceso de su publicación.

Ramírez, A., Schaaf, P. y González, P.

*Fechamientos Arqueológicos y Geológicos por el Método de Termoluminiscencia*  
Instituto de Geofísica UNAM, Reportes Internos 97-14, 1997.

González, P., Chung, H., Azorín, J., Schaaf, P. and Ramírez, A.

*Thermoluminescence Dating of a Pottery Sample from Edzna-Campeche, México.*  
Nuclear Science Journal, Vol.35, No. 4, pp. 280-284, august 1998.

González, P., Azorín, J., Schaaf, P. and Ramírez, A.

*Assessing the Potential of Thermoluminescence Dating of Pre-Conquest Ceramics from Calixtlahuaca, Mexico*  
Radiation Protection Dosimetry, Vol. 84, pp.483-487, Nuclear Technology Publishing, 1999

Ramírez, A., Schaaf, P. y Filloy, L.

*Prueba de Autenticidad en Cerámicas y Figuras Arqueológicas por Termoluminiscencia.*

Memorias: II Conferencia Internacional y XII Congreso Nacional sobre Dosimetría de Estado Sólido, pp. 47-52, 1999.

González, P., Mendoza, D., López, C. Ramírez, A., Schaaf, P. y Mondragón, M.  
*Fechado de Muestras Arqueológicas de Teotenango por el Método de Termoluminiscencia.*  
 Informe Técnico CB-002/01, Departamento de Física, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Marzo de 2000.

### 5.3 Sitios de Estudio

Alrededor de 15 muestras geológicas y 40 muestras arqueológicas han sido analizadas dentro del laboratorio de termoluminiscencia, la diversidad de sitios de los que provienen estas muestras a continuación se presentan:

Arqueológicos	Geológicos
Teotihuacan (Mexica)	Desierto de Sonora (paleodunas)
Chichen Itza (Maya)	Nevado de Toluca (domo y escurrimientos)
Labná (Maya)	Popocatepelt (lajares)
Cacaxtla (Olmeca-xicalanca)	Valsequillo (derrame y flujo piroclástico)
Calixtlahuaca (Matlazinca)	Zacango (paleosuelos)
Teotenango (Matlazinca)	Brasil (paleosuelos)
Hervideros (Chalchihuites y Tepehuanes)	Tlaxcala (mina de diatomitas)
Cholula (Mexica-tolteca-chichimeca)	Morelos (paleosuelos)
Dzibilchaltún (Maya)	
Ek Balam (Maya)	
Comalcalco (Maya)	
Santa Cruz (Matlazinca)	
Edzná (Maya)	
Oaxaca (Zapoteca)	
Museo Nacional de Antropología (varios)	
Colecciones Particulares (varios)	

### 5.4 Congresos

La divulgación de los resultados obtenidos en el laboratorio se han presentado en congresos de diferentes disciplinas y áreas de investigación:

Fifth Chemical Congress of North America

*Tema: Preparation of LiF:Mg,Cu,P+PTFE Thermoluminescent Dosimeters to be Used in Applications of Ionizing Radiation.*

Sede: Cancún, México.

X Congreso Nacional sobre Dosimetría de Estado Sólido

*Tema: Técnica de "Quartz Inclusion" para Fechamiento Geológico por TL*

Sede: Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México

Ciclos de Divulgación Científica de Ciencias de la Tierra

*Tema: la Termoluminiscencia en Salud, Arqueología, Ciencias de la Tierra y del Espacio*

Sede: Museo de Geología, México D.F.

12<sup>th</sup> International Conference in Solid State Dosimetry

*Tema: Archaeological Dating of Calixtlahuaca Site In Mexico Using TL*

Sede: Casa del Cordón, Burgos, Spain.

Cuarto Congreso Internacional de Mayistas

*Tema: Ensayo de Fechamiento de la Cerámica Pizarra con el Método de Termoluminiscencia*

Sede: La Antigua, Guatemala.

I Conferencia internacional y XI Congreso Nacional sobre Dosimetría de Estado Sólido

*Tema: Bleaching Method for Dating of Geological Samples*

Sede: Centro Internacional de Prospectiva y Altos Estudios, Puebla, México.

IV Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear (IRPA) y I Congreso Iberoamericano de Sociedades de Protección Radiológica.

*Tema: Propiedades Dosimétricas de LiF:Mg,Cu,P+PTFE*

Sede: La Habana, Cuba.

I Coloquio Nacional de Arqueometría

*Tema: Termoluminiscencia (TL) y Radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ) en la Zona Arqueológica EL Olote Durango.*

Sede: Instituto de Investigaciones Antropológicas UNAM, México.

II Conferencia Internacional y XII Congreso Nacional sobre Dosimetría de Estado Sólido

*Tema: Prueba de Autenticidad en Cerámicas y Figuras Arqueológicas por TL*

Sede: Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del IPN, México

9<sup>th</sup> International Conference on Luminescence and Electro Spin Resonance Dating. LED99

*Tema: Thermoluminescence Dating of an Archaeological Sample from Northern Mexico*

Sede: Complesso Monumentale del San Michele, Rome, Italy.

IV Reunión sobre Geología del Noroeste de México y Areas Adyacentes

*Tema: Edades de Termoluminiscencia de Dunas de la Playa San Bartólo Sonora y su Relación con el Establecimiento de las Actuales Condiciones Aridas.*

Sede: Estación Regional del Noroeste (ERNO) del Instituto de Geología UNAM, Hermosillo, México.

III Conferencia Internacional y XIII Congreso Nacional sobre Dosimetría de Estado Sólido

*Tema: La Termoluminiscencia como Herramienta en la Reconstrucción de Eventos Volcánicos*

Sede: Facultad de Medicina, Universidad Autónoma del Estado de México, México

Unión Geofísica Mexicana, 2<sup>a</sup> Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra

*Tema: Reconstrucciones paleoclimáticas con el método de termoluminiscencia: edades de paleodunas de la Playa San Bartolo, Sonora.*

Sede: Hotel Camino Real, Puerto Vallarta, México

II Coloquio Nacional de Arqueometría

*Tema: Secuencias Cronológicas Basadas en Fechamientos de Cerámicas por Termoluminiscencia: Edzná y Teotenango.*

Sede: Instituto de Investigaciones Antropológicas UNAM, México.

## 5.5 Estudiantes y Tesistas

Los resultados obtenidos dentro del laboratorio de termoluminiscencia han contribuido a la formación profesional de estudiantes de diferentes niveles, en algunos casos apoyándolos en la elaboración de su tesis al ser los fechamientos por TL un elemento de argumentación en sus investigaciones. A continuación se presenta una lista de los tesistas que han empleado al fechamiento por termoluminiscencia como una parte de su trabajo de investigación.



Nombre	Grado obtenido	Tesis	Institución
Heajoo Chung Seu	Doctor (Estudios Mesoamericanos)	Chichen Itza de 800 a 1200	Facultad de Filosofía y Letras UNAM
Pedro R. González Martínez	Doctor (Ciencias)	Fechaamiento geológico y arqueológico por termoluminiscencia	Ciencias Básicas e Ingeniería UAM – Iztapalapa
José Luis Punzo	Licenciado (Arqueología)	La mesa de Tlahuitoles en lo alto de la Sierra Madre de Durango: Apuntes para la historia antigua Xixime	Escuela Nacional de Antropología e Historia
Palmira Martínez Solís	Licenciado (Ingeniería Química)	Monitoreo radiológico ambiental por TL en el sitio arqueológico de Cholula Puebla	Facultad de Ingeniería Química Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Dolores Mejía Flores	Licenciado (Ingeniería Química)	Preparación de muestras arqueológicas para su fechamiento por termoluminiscencia	Facultad de Ingeniería Química Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Nombre	Grado a obtener	Tesis	Institución
Fernando Acéves Quesada	Doctor (Vulcanología)	Elaboración de mapas de riesgo volcánico basados en sistemas de información geográfica. Caso Volcán Nevado de Toluca	Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica UNAM
Angel Ramirez Luna	Maestro (Gestor de Tecnología)	El laboratorio de fechamiento por termoluminiscencia del Instituto de Geofísica UNAM (aplicación y desarrollo de metodologías y técnicas)	Facultad de Química, UNAM
Sandra Gallegos Ochoa	Maestro (Arqueología)	(no registrada)	Escuela Nacional de Antropología e Historia
Yoshiyuki Tsukada	Licenciado (Arqueología)	(no registrada)	Escuela Nacional de Antropología e Historia

## 5.6 Colaboración con otras Instituciones

La relación con otras instituciones es prioritario para el constante mejoramiento de los métodos y técnicas de fechamiento, así como la búsqueda de información relevante que involucra los aspectos físico-teóricos del fenómeno, es por esto que el laboratorio mantiene una constante colaboración, entre estas instituciones se encuentran:

- ◆ Instituto de Geología (IG), UNAM
- ◆ Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ)
- ◆ Forschungsstelle Archäometrie Max Planck Institut Für Kernphysik, Heidelberg, Alemania
- ◆ Instituto de Investigaciones Antropológicas (IIA), UNAM
- ◆ Desert Research Institute, Reno Nevada, USA
- ◆ Instituto de Ciencias Nucleares (ICN), UNAM
- ◆ Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH)
- ◆ Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa (UAM-I)
- ◆ Universidad de Sonora (UNISON)

## 5.7 Divulgación del Servicio

Se cuenta con un folleto (tríptico) donde se muestran los servicios que ofrece el laboratorio así como el precio por tipo de muestra, próximamente el laboratorio de termoluminiscencia contará con una pagina en internet dentro del IGEF donde se mostrara los servicios que se ofrece y las características del laboratorio.

## 6. CONCLUSIONES

A continuación se presentan algunas de las conclusiones llevadas a fin por los investigadores involucrados en los diferentes proyectos de investigación a partir de los resultados de los fechamientos por TL:

Trabajo: Cronología de Edzná, Campeche México con el Método de Termoluminiscencia

Investigador: Dra. Heajoo Chung Seu (arqueología de la zona Maya).

*Las fechas obtenidas en las capas III, II y superficial, presentaron una diferencia de 250 a 300 años entre ellas, esa diferencia se acerca a la cronología cultural establecida por el análisis tipológico de la cerámica.*

*La fecha obtenida en la muestra CH3 es muy cercana a la obtenida por  $^{14}\text{C}$  realizada al estuco de un piso dentro de la misma estructura.*

*Las muestras CH4 y CH5 a pesar de provenir de diferentes sitios arqueológicos (Chichen Itzá y Edzná a 300 km. de distancia) presentaron edades cercanas entre ellas. Esto confirma la cronología definida por el análisis tipológico en este tipo de cerámicas (Pizarra Gris).*

*Las edades resultantes por TL tanto absolutas como relativas, fortalecen los conocimientos cronológicos de Edzná.*

*La aplicación del método de termoluminiscencia es confiable para establecer secuencias cronológicas en sitios arqueológicos.*

Trabajo: Edades de Termoluminiscencia de Dunas de la Playa San Bartolo, Sonora y su Relación con el Establecimiento de las Actuales Condiciones Áridas

Investigador: Dra. Beatriz Ortega Guerrero (geología del noroeste de México).

*Las edades de TL proporcionan una importante herramienta en el establecimiento de escalas de tiempo en donde no existe materia orgánica en abundancia suficiente para emplear otros métodos tradicionales de fechamiento, como el  $^{14}\text{C}$ .*

*Las edades preliminares obtenidas por TL de los depósitos eólicos al E de la playa San Bartolo son consistentes con su posición estratigráfica.*

*Este fechamiento ofrece datos nuevos sobre las condiciones ambientales durante el Holoceno tardío. Los resultados obtenidos indican que las condiciones áridas aparentemente prevalecieron durante los últimos ca. 4,000 años en esta porción del desierto de Sonora.*

*La edad del cordón de duna coincide con el déficit de humedad efectiva registrado en varios sitios del desierto de Sonora después de los 5,000 años A.P., y con el tiempo de máxima deflación de depresiones tipo playa lake estimado para varios sitios en el desierto de Chihuahua.*

Trabajo: La Termoluminiscencia como Herramienta en la Reconstrucción de Eventos Volcánicos

Investigador: Dra. Ana Lillian Martín del Pozo (vulcanología de México)

*Se pensaba que el vulcanismo en la zona de estudio era más antigua, sin embargo con esta edad se presenta una nueva perspectiva de la historia eruptiva en la región.*

*El resultado obtenido por termoluminiscencia será complementado con estudios morfoestratigráficos de detalle que lo complementen y ratifiquen.*

*Para el rango de edad esperado para esta zona (de 40, 000 a 200, 000 años) los métodos conocidos como el  $^{14}\text{C}$  y K-Ar no son los adecuados, ya que estas edades se salen de su escala de medición, además de contener en ocasiones poco o nulo material fechable, sin embargo, el fechamiento por termoluminiscencia no mostró problema alguno al respecto.*

*En México se tiene registrado mucho vulcanismo en esta situación, y con este trabajo se abre un gran campo de acción para el fechamiento geológico por termoluminiscencia.*

**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**

Título del Trabajo: Termoluminiscencia (TL) y Radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ) en la Zona Arqueológica El Olote, Durango.

Autor: Arqueólogo Fernando Berrojalbiz (asentamientos humanos en la zona de Hervideros Durango)

*Considerando las desviaciones de las edades contempladas en estos dos métodos, se puede apreciar una similitud en los resultados, dando una confiabilidad al fechamiento arqueológico por termoluminiscencia.*

*La terraza donde se realizó el pozo de sondeo, parece corresponder por los materiales de superficie y los de excavación, a la ocupación Chalchihuites, datos que se corroboran con los fechamientos realizados por termoluminiscencia (TL) y por radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ).*

Como podemos apreciar en las conclusiones anteriores, los fechamientos por termoluminiscencia han desempeñado un papel preponderante en varias líneas de investigación, el interés sobre este método de fechamiento a captado la atención de cada vez mas investigadores quienes lo contemplan como una valiosa herramienta para sus investigaciones.

Al momento en el laboratorio se ha puesto a punto las técnicas de fechamiento, así mismo se ha formado y mantenido una estrecha colaboración con investigadores de diferentes disciplinas e instituciones nacionales y extranjeras, la publicación de artículos ha tenido lugar en revistas internacionales presentando resultados de interés para la comunidad científica, se ha asesorado y capacitado a estudiantes de posgrado en materia de fechamiento por TL y se ha participado en congresos especializados y platicas libres de divulgación de la ciencia.

De manera tal que podemos decir que el objetivo de la puesta en operación del Laboratorio de Termoluminiscencia se ha cumplido hasta el momento, no obstante es necesario seguir depurando e innovando las técnicas que intervienen durante el proceso de fechamiento marcando tendencia hacia la calidad y rapidez del servicio, además, es primordial para la evolución y desarrollo del laboratorio el estudio y aplicación de nuevos métodos de fechamiento como el de la luminiscencia ópticamente estimulada (OSL) y de esta manera mantener el laboratorio a la vanguardia en este tipo de tecnologías.

## 7. BIBLIOGRAFIA

**Adamiec, G. and Aitken, M.**

*Dose-rate conversion factors: update*

Ancient TL, a periodical devoted to Luminiscence and ESR dating. Vol. 16, No.2, p.p. 37-50 november 1998.

**Aitken, M.**

*Thermoluminescence Dating*

Academic Press, London 1985.

**Aitken, M.**

*Science-based Dating in Archaeology*

Longman Archaeology Series, London 1990.

**Bowman, S.G.E.**

*Dependence of Supralinearity on Predose: Some Observations*

Archaeometry, Vol. 17 p.p. 129-132, 1975.

**Berger, G.W. and Huntley, D.J.**

*Dating Volcanic Ash by TL*

PACT Journal Vol. 9, 581-592, 1983.

**Chung Seu, H.**

*Tesis Doctorado: Chichen Itza de 800 a 1200 dC*

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, México 2000.

**Delaney, C. and Finch, E.**

*Radiation Detectors, Physical Principles and Applications*

Oxford Science Publications, United States 1992.

**De los Rios, M.**

*La Termoluminiscencia en el Fechamiento de Sitios Arqueológicos*

Instituto Nacional de Antropología e Historia, México 1989.

**Geyh, A. and Schleicher, H.**

*Absolute Age Determination, Physical and Chemical Dating Methods and Their Application*

Springer-Verlag, Germany 1990.

**Faure, G.**

*Principles of Isotope Geology*

Jhon Wiley & Sons, United States 1986.

**Fleming, S.J.**

*Thermoluminescent Dating: Refinement of the Quartz Inclusion Method*

Archaeometry, Vol. 13 p.p. 29-52, 1971.

**Fleming, S.J.**

*Supralinearity Corrections in Fine Grain Thermoluminescence Dating: a Reappraisal*

Archaeometry, Vol. 17 p.p. 122-128 1975.

**González, P.**

*Tesis Doctorado: Fechamiento Geológico y Arqueológico por Termoluminiscencia*

Universidad Autónoma Metropolitana, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, México 1999

**González, P., Chung, H., Azorín, J., Schaaf, P. and Ramírez, A.**

*Thermoluminescence Dating of a Pottery Sample from Edzna-Campeche, Mexico.*

Nuclear Science Journal, Vol.35, No. 4, pp. 280-284, august 1998.

**González, P., Azorín, J., Schaaf, P. and Ramírez, A.**

*Assessing the Potential of Thermoluminescence Dating of Pre-Conquest Ceramics from Calixtlahuaca, Mexico*

Radiation Protection Dosimetry, Vol. 84, pp.483-487, Nuclear Technology Publishing, 1999

**Mejdahl, V.**

*The Plateau Method for Dating Partially Bleached Sediments by Thermoluminescence.*  
Quaternary Science Review, Vol. 7, pp.347-348, 1988.

**Ramírez, A.**

*Tesis Licenciatura: Preparación de Dosímetros Termoluminiscentes de LiF:Mg,Cu,P+PTFE para Monitoreo Radiológico Ambiental y Radiodiagnóstico*  
Universidad Veracruzana, Facultad de Química, México 1996.

**Ramírez, A., Schaaf, P. y González, P.**

*Fechamientos Arqueológicos y Geológicos por el Método de Termoluminiscencia*  
Instituto de Geofísica UNAM, Reportes Internos 97-14, 1997.

**Ramírez, A., Schaaf, P. y Filloy, L.**

*Prueba de Autenticidad en Cerámicas y Figuras Arqueológicas por Termoluminiscencia.*  
Memorias: II Conferencia Internacional y XII Congreso Nacional sobre Dosimetría de Estado Sólido, pp. 47-52, 1999.

**Shinghvi A.K. and Wagner G.A.**

*Thermoluminescence Dating and Its Applications to Young Sedimentary Deposits*  
Dating Young Sediments, Proceedings of the Worrkshop p.p.159-198, China, september, 1985.

**Whittle E.H. and Arnaud J.M.**

*Thermoluminescent Dating of Neolithic and Clacolithic Pottery from Sites in central Portugal*  
Archaeometry, Vol. 17 p.p. 5-24 1975.

**Zimmerman D.W.**

*Thermoluminescent Dating Using Fine Grains from Pottery*  
Archaeometry Vol. 13, p.p 29-52, 1971.