

00576

2ej

4

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE
MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA

**EL SODIO 22 EN EL ESTUDIO DE SALES MIGRATORIAS EN
MATERIALES DE CONSTRUCCION PREHISPANICA DE TULA, HIDALGO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS NUCLEARES**

P R E S E N T A

GUSTAVO LEONARDO MARTINEZ CORNEJO

ASESOR (UNAM) : DR. MANUEL NAVARRETE TEJERO

ASESOR (ININ) : M.en C. DEMETRIO MENDOZA ANAYA

México, D.F.

1998

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

262973



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA
DIRECCIÓN

ING. LEOPOLDO SILVA GUTIÉRREZ
Director General de la Administración Escolar
Presente.

AT'N: Lic. Antonio Díaz García

Jefe de la Unidad de Administración del Posgrado.

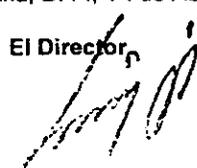
Me es grato informarle que el alumno I.Q. **GUSTAVO MARTÍNEZ CORNEJO**, presentará próximamente su examen para obtener el grado de Maestría en Ciencias Nucleares ante el siguiente jurado:

Presidente:	Dra. Guillermina Burillo Amezcua (ICN)
Primer Vocal	Dr. José Luis Galván Madrid (ININ)
Secretario:	M. en C. Luis Cabrera Mosqueda
Primer Suplente:	M. en C. Trinidad Martínez Castillo
Segundo Suplente:	M. en C. Jesús Soberón Mobarak

Sin otro particular de momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Ciudad Universitaria, D. F., 1º. de Abril de 1998.

El Director,


Dr. Enrique R. Bazúa Rueda

C.c.p. Integrantes del Jurado
C.c.p. Coordinador de Área
C.c.p. Departamento de Control Escolar
C.c.p. Interesado
*ggm.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo lo dedico con mucho amor y cariño a:

MI ESPOSA ESTELA*

por su gran ayuda y comprensión en su momento.

A mis hijos:

OSVALDO

OSCAR

LEONARDO

CRISTAL

Y A SU ABUELITA CARMELA.

Por medio de estas breves líneas deseo hacer patente mi agradecimiento y reconocimiento a todas aquellas personas que han contribuido en mi formación personal y académica.

Al Dr. Manuel Navarrete Tejero, por su acertada dirección para la realización de este trabajo y por compartir conmigo desinteresadamente sus conocimientos.

Al M. en C. Demetrio Mendoza Anaya, por su valiosa ayuda para la culminación de este trabajo y por compartir conmigo su sincera amistad.

Al M. en C. Ventura Rodríguez Lugo, por su valiosa ayuda para concluir la presente tesis y por la gran amistad que me ha brindado.

A los sinodales de este trabajo:

Dra. Guillermina Burillo Amezcua.

Dr. José Luis Galván Madrid.

M. en C. Luis Cabrera Mosqueda.

M. en C. Trinidad Martínez Castillo.

M. en C. Jesús Soberón Mobarak.

Por haber aceptado ser parte del jurado, cediendo parte de su valioso tiempo para revisar minuciosamente este trabajo y por sus sugerencias que mejoraron substancialmente el contenido del mismo.

Mi más grande respeto, amor y agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México, por albergarme en su seno y proporcionarme la mejor educación profesional.

Al Instituto Nacional de Antropología e Historia (CNRPC) por ser el centro de trabajo donde me he desarrollado profesionalmente.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, por permitirme el acceso y hacer uso de sus instalaciones.

Finalmente deseo agradecer a mis compañeros y amigos:

Alfonso Cortés, Jesús Arenas, Gilberto Mondragón, Manuel Espinosa, Pedro González, Gerardo Canizales, Rolando Araujo, Gloria Vera, Armando Soto, Juan Márquez, Constantino Reyes, Humberto Arreola, Germán López, Luciano Cedillo, Vicki Teherán, Elsa Rodríguez, Isaías. Todos ellos, por su amistad, sus consejos y sugerencias durante el desarrollo de este trabajo.

INDICE

	PAG.
RESUMEN	4
INTRODUCCION	5
CAPITULO 1 CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE RADIOTRAZADORES Y SU APLICACION.	8
1.1- Consideraciones generales sobre trazadores	8
1.2- Trazadores no isotópicos	8
1.3- Trazadores isotópicos	9
1.4- Antecedentes históricos de los radiotrazadores	10
1.5- Radiotrazador ideal	12
1.6- Ventajas y desventajas de un radiotrazador	14
1.7- Manejo de isótopos radiactivos	15
1.8- Técnicas de detección y cuantificación de la radiación	15
1.9- Fuentes radiactivas	16
1.10- Tipos de decaimiento radiactivo	16
1.11- Energías de decaimiento	18
1.12- Ley de decaimiento radiactivo	19
1.13- Vida media de una fuente radiactiva	21
1.14- Absorción y adsorción	24

<i>CAPITULO 2</i>	<i>IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LA MIGRACION DE SALES EN MATERIALES DE CONSTRUCCION PREHISPANICA</i>	<i>26</i>
	<i>2.1- Antecedentes de la zona arqueológica de Tula, Hidalgo</i>	<i>26</i>
	<i>2.2- Naturaleza del problema</i>	<i>28</i>
<i>CAPITULO 3</i>	<i>DESARROLLO EXPERIMENTAL.</i>	<i>33</i>
	<i>3.1- Muestreo</i>	<i>33</i>
	<i>3.2- Caracterización por diferentes técnicas</i>	<i>37</i>
	<i>3.2.1- Microscopia electrónica analítica de barrido</i>	<i>37</i>
	<i>3.2.2- Difracción de rayos X</i>	<i>39</i>
	<i>3.3- Aplicación del método de radiotrazadores</i>	<i>39</i>
	<i>3.4- Procedimiento de absorción del radiotrazador</i>	<i>42</i>
	<i>3.5- Proceso de transformación de sales</i>	<i>43</i>
	<i>3.6- Proceso de eliminación del radiotrazador</i>	<i>44</i>
<i>CAPITULO 4</i>	<i>RESULTADOS Y CONCLUSIONES.</i>	<i>45</i>
	<i>4.1- Caracterización</i>	<i>45</i>
	<i>4.2- Preparación de la solución marcada (^{22}Na)</i>	<i>53</i>
	<i>4.3- Absorción del radiotrazador</i>	<i>54</i>
	<i>4.4- Transformación del sulfato de sodio a sulfato de bario</i>	<i>57</i>
	<i>4.5- Eliminación del sodio</i>	<i>59</i>
	<i>4.6- Análisis de resultados y conclusiones</i>	<i>69</i>

<i>APENDICE</i>	<i>CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE DETECTORES.</i>	<i>72</i>
	<i>A-1. Cámara de niebla</i>	<i>72</i>
	<i>A-2. Detectores de gas</i>	<i>74</i>
	<i>A-3. Detectores de centelleo</i>	<i>78</i>
<i>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</i>		<i>81</i>

RESUMEN

El método de radiotrazadores se ha constituido como una de las herramientas más adecuadas para analizar el proceso de migración de fluidos a través de cuerpos porosos. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de la aplicación del método de radiotrazadores en el seguimiento de migración de sales solubles en materiales pétreos de origen prehispánico, con el fin proponer métodos adecuados de conservación.

Las sales solubles junto con el agua de lluvia, son uno de los principales factores en la destrucción de materiales pétreos, por lo que usando el método de radiotrazadores, se logró conocer el movimiento de migración de sales solubles en muestras de piedra usadas como ornamentación prehispánica en la zona arqueológica de Tula, Hidalgo.

Dado que estos materiales mostraron la presencia de sales de sulfato de sodio (tenardita) se impregnó varias muestras del material pétreo con una solución acuosa de sulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ al 10%), marcada con el radioisótopo Na-22 (^{22}Na), encontrándose que la sal se distribuye en forma diferencial a través de toda la estructura del material.

Una vez conocido el proceso de migración de las sales, se propuso un método de sustitución de sales de sulfato de sodio por sales de sulfato de bario, las cuales son de muy baja solubilidad, lográndose con esto:

- a) Evitar la movilidad de los iones de sulfato de sodio al formar el precipitado de sulfato de bario cuya estructura cristalina es polimorfa.*
- b) Evitar el crecimiento y contracción por hidratación y deshidratación de los iones sulfato, al combinarse con el bario.*
- c) Reducir la porosidad de las piedras al quedar depositada la sal insoluble de sulfato de bario en los pequeños espacios de su interior, al mismo tiempo que se, aumentó la adsorción de otras sales, evitando así la formación y acumulación de eflorescencias en el exterior, reduciendo el fenómeno de eflorescencia de las sales de sodio con lo cual se reduce el deterioro causado por la exfoliación y estallamiento.*

INTRODUCCION

La migración de sustancias solubles a través de la materia es un hecho común. Así por ejemplo, el agua migra a través del subsuelo, la sangre a través del cuerpo, sales minerales a través de la raíz y tallo de una planta, etc.

Hacer un seguimiento de la trayectoria que siguen estas sustancias en muchas ocasiones es difícil o hasta imposible. Pero existen medios o herramientas que nos permiten resolver este tipo de problemas. Tal es el caso del método de radiotrazadores, en el que al combinarse un isótopo radiactivo con la sustancia soluble que se desea estudiar, y debido a la radiación emitida por el isótopo, éste puede ser capaz de atravesar un medio y al detectarse permite hacer un seguimiento de la trayectoria de la sustancia en estudio. De esta manera, los radiotrazadores han podido ser utilizados en la industria, en el área médica, en la química orgánica e inorgánica, en bioquímica, en hidrología, etc.

Una aplicación del método de radiotrazadores puede ser en el área de conservación y restauración de monumentos arqueológicos. En este caso pueden jugar un papel fundamental en el seguimiento de sustancias solubles que se encuentran presentes en los materiales de una construcción prehispánica.

Estas sustancias solubles migran debido a la humedad interna que proviene del subsuelo, la cual es capaz de arrastrarlas a través de la estructura interna del material pétreo, provocando con ello rompimientos en forma laminar (exfoliaciones) y estallamientos, haciendo que estos se disgreguen en forma parcial y en algunos casos, hasta total.

Un ejemplo claro de esto se ha observado en la zona arqueológica de Tula, específicamente sobre los bajorrelieves adosados al edificio B, que debido a este fenómeno, se observa una gran cantidad de eflorescencias en la superficie de estos materiales, lo que ha ocasionado un deterioro comparable o mayor que los provocados por agentes externos (lluvia, viento, luz solar y gradientes de temperatura). Este deterioro significa la pérdida de objetos históricos irremplazables y de gran valor.

Los primeros estudios realizados sobre las eflorescencias mostraron que están constituidas por sales higroscópicas que a menudo se consideran inofensivas, sin embargo, estudios más recientes coinciden en que estas sales son más dañinas cuando su higroscopicidad es menor, porque los daños ocurren como un resultado de su disolución, cristalización y recristalización [1-28].

Las eflorescencias constituidas por sustancias solubles que provienen del interior del núcleo del edificio B y de los materiales que lo rodean son muy diversas. Por esto es por lo que para conocer el fenómeno de las eflorescencias es importante establecer primero el mecanismo de migración de sales a través de piedras, determinando la dirección preferencial y su velocidad. Por tal razón, el objetivo principal de este trabajo fue realizar un estudio de laboratorio sobre el proceso de migración de las sales solubles a través de piedras provenientes de los bajorrelieves adosados al edificio B de la zona arqueológica de Tula, mediante el uso del método de radiotrazadores. Una vez estudiado este proceso y con base en los resultados proponer un mecanismo adecuado para impedir la migración del interior hacia el exterior.

Para llevar a cabo el estudio, fue necesario verificar en primer lugar, la composición química de las eflorescencias para determinar el tipo de sales presentes. Con base en esto seleccionar el radioisótopo más adecuado que va a ser agregado a la sustancia soluble, tomando en cuenta la afinidad con el tipo de sales presentes en estos materiales, así como las características intrínsecas del radiotrazador (tipo de radiación emitida, vida media, disponibilidad, etc.).

El trabajo escrito se ha dividido en cuatro capítulos. En el capítulo uno se da una explicación detallada de los radiotrazadores, así como las condiciones que deben cumplir al aplicarse a un problema en particular.

En el capítulo dos, se da una explicación sobre la influencia de la migración de sales debido a la humedad del subsuelo, y del deterioro de los materiales de construcción prehispánica, y el papel que pueden desempeñar los radiotrazadores en el estudio de la migración de sales.

En el capítulo tres se presenta el desarrollo experimental del trabajo realizado, incluyendo el proceso de recolección de muestras, la caracterización de las sales por difracción de rayos X y microscopía electrónica analítica de barrido. Con base en los resultados obtenidos, se explica el razonamiento para la selección del radiotrazador y el trabajo de laboratorio relacionado con la aplicación de éste en el seguimiento de las sales migratorias y el intercambio de éstas por otro tipo de sales.

En el capítulo cuatro se presentan los resultados obtenidos, el análisis y las conclusiones.

Finalmente, para completar el trabajo se consideró necesario anexar un apéndice donde se explican los principales tipos de detectores de radiación, haciendo énfasis en el que se utilizó.

CAPITULO 1

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE RADIOTRAZADORES Y SU APLICACION

1.1- Consideraciones generales sobre trazadores

Con el nombre de trazador[29] se designa, en general, cualquier producto que, incorporado a la masa de una sustancia, permite investigar el comportamiento de ésta en un determinado proceso físico o químico. Para efectos de este estudio, interesa conocer las características del trazador utilizado y el comportamiento dinámico de las sales en los materiales sólidos. En este capítulo nos referimos, exclusivamente, a los trazadores empleados para investigar el movimiento de las sales.

El uso de trazadores es muy antiguo, y se han utilizado, unas veces adicionados expresamente al medio por el hombre, y otras aprovechando determinadas sustancias incorporadas en éste como una consecuencia de procesos naturales o al ser vertidos accidentalmente.

Con base en el comportamiento de estos trazadores pueden extraerse conclusiones del comportamiento de la sustancia marcada en un medio dado, siempre y cuando la represente adecuadamente y no actúen de manera fundamental cambiando el medio de estudio.

Los trazadores se pueden dividir en dos grupos: trazadores no isotópicos y trazadores isotópicos.

1.2 Trazadores no isotópicos

Los trazadores no isotópicos consisten en determinados compuestos químicos solubles en el agua, y son fácilmente identificables, principalmente los compuestos iónicos y colorantes; pero tienen la desventaja de que la información obtenida deberá ser interpretada con cierta prudencia cuando el trazador discurre por medios de composición litológica heterogénea.

Dentro de los trazadores no isotópicos más utilizados, podemos diferenciar dos tipos: los trazadores denominados químicos, tales como cloruro de sodio, fenoles, ácido bórico,

detergentes, etc. y los colorantes, entre los que cabe citar la fluoresceína, dicromato de potasio, rodamina B, eosina, rojo de congo, azul de metileno, anilina y algunos otros.

1.3- Trazadores isotópicos

Los trazadores isotópicos consisten en elementos que pueden ser estables o inestables, pero que resultan ser isótopos de algún elemento presente en el compuesto que se desea estudiar. Los trazadores isotópicos están divididos en cuatro grupos :

- a) Trazadores radiactivos expresamente adicionados.
- b) Trazadores activables, formados por sustancias no radiactivas y cuya concentración se determina mediante análisis por activación.
- c) Trazadores radiactivos naturales.
- d) Isótopos estables en el agua.

A continuación se da una breve explicación de cada uno de éstos:

- a) Como trazadores radiactivos se utilizan radioisótopos obtenidos en reactores nucleares, que se detectan a través de las radiaciones emitidas: generalmente beta o gamma. A pesar del elevado número de radioisótopos conocidos, son relativamente pocos los utilizados como trazadores en fase acuosa, en este estudio el radioisótopo ^{22}Na es utilizado para determinar la migración de sales en el material pétreo, así como su transformación por reacción química.
- b) Trazadores activables.- En este procedimiento de marcado, se utiliza como trazador un compuesto químico no radiactivo que contiene un elemento fácilmente detectable mediante análisis por activación. La activación de dicho elemento se lleva a cabo irradiando en el reactor nuclear las muestras. En esta irradiación, el elemento utilizado como trazador da lugar a un determinado radioisótopo fácilmente identificable y medible a través de la radiación que emiten.
- c) Trazadores radiactivos naturales. Dentro de los isótopos radiactivos naturales que se conocen en la actualidad, corresponden en su mayor parte a núclidos con un número de masa mayor de 209 y número atómico mayor de 83, no obstante algunos elementos más livianos tienen isótopos radiactivos naturales como el ^{14}C , ^{40}K y el ^3H , los cuales se encuentran ya sea disueltos o formando parte de su propia molécula.

d) *Isótopos estables en el agua. La proporción con la que cada isótopo estable entra a formar parte del elemento natural en una forma definida y constante se conoce como abundancia isotópica y suele expresarse en tanto por ciento. De acuerdo con dicha composición isotópica, junto con las moléculas de H_2O^{16} , que es más abundan en el agua, también existen otras moléculas en las que intervienen los restantes isótopos de ambos elementos, por ejemplo 2H (deuterio) y 3H (tritio).*

1.4.- Antecedentes históricos de los radiotrazadores.

El descubrimiento de la radiactividad por Henry Becquerel en 1896 y el descubrimiento de radio por Madame Curie y Joliot Curie dos años después, marcaron el inicio de una nueva área en la Física, la Física Nuclear, que se consolidó como tal cuando en 1919 Rutherford logró realizar la transmutación de elementos a través de reacciones nucleares.

Los primeros experimentos con trazadores radiactivos son llevados a cabo en 1913 por G. de Hevesy y F. Paneth, cuando determinan la solubilidad de las sales de plomo usando uno de los isótopos radiactivos del plomo.

Después, G. de Hevesy y O. Chiewitz, en 1935, sintetizan ^{32}P usándose este trazador en estudios biológicos. En el mismo año George de Hevesy y colaboradores realizan análisis por activación en tierras raras[30].

Actualmente se les da el crédito a Irene Curie y Joliot Curie (1934) por la producción extensiva de isótopos radiactivos artificiales. Ellos utilizaron partículas alfa del polonio teniendo éxito en la preparación de isótopos radiactivos de diferentes elementos. Las primeras fuentes de partículas alfa fueron de elementos radiactivos naturales tales como el ^{210}Po , radio-C, etc. Subsecuentemente los proyectiles de partículas alfa, neutrones, rayos gamma, etc., fueron producidos artificialmente por reacciones nucleares adecuadas; las siguientes ecuaciones (ecuaciones 1.1, 1.2 y 1.3) representan algunas de las reacciones llevadas a cabo para producir radioisótopos artificiales:





En los siguientes años una serie de instrumentos sofisticados tales como el acelerador, ciclotrón, sincrotrón, tetatrón, etc. se utilizaron como dispositivos para la producción de proyectiles de alta velocidad y muy energéticos. Después de la segunda guerra mundial, los reactores nucleares son introducidos como fuentes prolíficas de neutrones (flujos de 10^{12} a 10^{14} n $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$), al realizarse la fisión del ${}^{235}\text{U}$.

La elección de un material para producir un radioisótopo por medio de una reacción nuclear característica es un punto de gran importancia, pues de ello depende, en gran medida, la pureza radioquímica del producto radiactivo. De este modo, para producir ${}^{22}\text{Na}$ no es conveniente irradiar cloruro de sodio en un reactor nuclear porque el ${}^{38}\text{Cl}$ se formaría al mismo tiempo que el ${}^{22}\text{Na}$. Sin embargo, el carbonato de sodio o bicarbonato, es una buena elección del blanco, debido a que el oxígeno, el hidrógeno y el carbono no forman isótopos radiactivos por reacción neutrón gamma.

En general, los compuestos formados con los elementos oxígeno, carbono, hidrógeno y nitrógeno son los elegidos para realizar reacciones neutrón-gamma, y activar elementos que entran en combinación con ellos, debido a que no inducen radiactividad alguna con este tipo de reacción nuclear [31]. Los blancos en toda irradiación deben tener la máxima pureza y cualquier separación o purificación química es generalmente sencilla en comparación con la correspondiente radioquímica, al no existir limitaciones impuestas por el tiempo y la seguridad radiológica.

Una gran contribución para obtener radioisótopos de muy alta actividad específica, y gran pureza radioquímica, fue realizada por el descubrimiento de Szilard y Chalmers en 1934, quienes demostraron que las uniones químicas de ciertos elementos en determinados compuestos son rotas cuando se llevan a cabo reacciones nucleares siendo posible, por tanto, su completa separación de la molécula blanco. Como resultado de estos descubrimientos más de un millar de radioisótopos radiactivos artificiales han sido producidos.

Los trazadores radiactivos se detectan a través de las radiaciones emitidas, generalmente partículas beta negativas (negatrones) o positivas (positrones) y rayos X o radiación gamma. Debido a su mayor facilidad de medida suele preferirse el empleo de emisores de rayos gamma. Generalmente no se utilizan emisores alfa, principalmente por el escaso poder de penetración de estas partículas que constituye un grave inconveniente para su medida. Los emisores beta pueden detectarse in situ con detectores Geiger-Muller, de Centelleo o de algún otro tipo, pero a causa también del reducido alcance, sólo se detectan las partículas procedentes de las capas muy próximas a la zona sensible del detector. Por esta razón, la utilización del trazador rara vez se basa en la medida de estas partículas.

A pesar del elevado número de radioisótopos conocidos, son relativamente pocos los utilizados como radiotrazadores. Generalmente el precio y las posibilidades de adquisición, junto con las necesidades específicas del estudio (vida media, energía de la radiación, etc.), constituyen las bases principales de selección. Por tanto, consideramos oportuno analizar, brevemente las posibilidades ofrecidas por los radiotrazadores.

1.5.- Radiotrazador ideal

Un radiotrazador ideal [32,33] para soluciones acuosas, debería cumplir con las siguientes condiciones :

- 1) El comportamiento del radiotrazador en el proceso que se pretende investigar debe ser idéntico al del medio, es decir, el radiotrazador y el medio deben desplazarse a la misma velocidad (fidelidad de marcado). Esta condición exige a su vez, las siguientes consideraciones :
 - a) El radiotrazador no debe experimentar con el medio reacciones químicas que puedan interferir en su identificación posterior.
 - b) No debe reaccionar químicamente con los materiales del medio.
 - c) En general, no debe ser adsorbido por los materiales sólidos del medio.
 - d) En el caso de radiotrazadores iónicos, no deben producirse fenómenos de intercambio con los átomos del mismo tipo existentes en el medio.

- e) *La cantidad de radiotrazador a utilizar para una experiencia no debe modificar, de forma significativa, la densidad, viscosidad o temperatura del medio, a fin de que no se produzcan alteraciones en el flujo natural.*
- f) *Los fenómenos de dispersión y difusión del radiotrazador deben ser iguales que los correspondientes a las moléculas del medio.*

2.- Si se trata de un radiotrazador que deba ser adicionado expresamente al medio, éste no debe contener nada del mismo o sólo una concentración tan baja que no interfiera en los resultados.

3.- Debe ser fácilmente soluble en el medio.

4.- Debe permitir factores de dilución muy elevados, es decir, con una cantidad de radiotrazador razonablemente pequeño, han de poder marcarse volúmenes muy grandes.

5.- Es condición importante que el radiotrazador pueda medirse in situ, es decir, sin que sea necesario llevar a cabo toma de muestras.

6.- No debe contaminar el medio durante largos periodos de tiempo, a fin de que no interfiera en experiencias futuras.

7.- Debe ser de bajo costo y fácil manipulación.

No existe un radiotrazador que cumpla a la perfección todas estas condiciones, pero unos se acercan a ellas más que otros. De esta manera, su aplicación incluye[34-37]:

- *Detección de objetos ocultos.*
- *En procesos de mezclado homogéneo.*
- *Medida de volúmenes en contenedores inaccesibles.*
- *Medidas de flujo de fluidos.*
- *Pruebas de técnicas en filtración.*
- *Determinación de metales en sales complejas.*

- *Autodifusión en sólidos.*
- *Difusión en líquidos.*
- *Difusión en gases.*

1.6.- Ventajas y desventajas de un radiotrazador

Entre las ventajas que presenta el uso de los radiotrazadores podemos mencionar las siguientes :

- a) Extraordinaria sensibilidad de medida de 10^{16} a 10^6 g, lo cual permite diluciones extremas.*
- b) Posibilidad de medida in situ.*
- c) Vida media limitada del trazador, que además puede elegirse a voluntad, de acuerdo con la duración prevista del estudio.*
- d) La medida es selectiva, sin que haya posibilidad de interferencias debidas a otros materiales contenidos en el medio.*
- e) Un mismo radiotrazador puede emplearse en diversas formas químicas, sin que se modifique la sensibilidad de medida. Ello es muy importante, con vistas a conseguir que el comportamiento del radiotrazador se asemeje al de las moléculas del medio.*
- f) La radiactividad es independiente de la presión, temperatura y del estado físico y químico de los materiales.*
- g) La radiactividad es específica para un radiotrazador e invariable en presencia de elementos químicos idénticos.*

Entre las desventajas de los radiotrazadores podemos citar las siguientes :

- a) Necesidad de autorización para la adquisición y manipulación de materiales radiactivos.*
- b) En el caso de isótopos de vida media corta, estos tienen que adquirirse y utilizarse en plazos perentorios.*
- c) En general, el equipo de medida es más costoso que el utilizado con los trazadores no radiactivos.*
- d) El precio elevado del radiotrazador, aunque en algunos casos resultan más baratos que determinados colorantes y, en otros, el precio no desempeña un papel importante.*

1.7.- Manejo de los isótopos radiactivos.

Es condición necesaria la seguridad contra las radiaciones cuando se trabaja con ellas en el laboratorio por lo que a continuación se mencionan algunas reglas básicas de seguridad[38].

- 1) Licenciamiento.*
- 2) Capacitación.*
- 3) Conocimiento de los materiales radiactivos.*
- 4) Guardar todas las soluciones radiactivas y aparatos etiquetándolos, separándolas del equipo inactivo.*
- 5) Uso de guantes de hule (quirúrgico) siempre que se manejen soluciones radiactivas para evitar la contaminación peligrosa en las manos.*
- 6) Uso de pinzas o tenazas para el manejo de pastillas radiactivas.*
- 7) Cuando se pesen sólidos o líquidos radiactivos utilizar plásticos o contenedores de doble fondo cuando sea posible.*
- 8) Uso de un medidor o monitor para revisar la contaminación del equipo y laboratorio después de haber realizado cualquier experimento.*
- 9) Utilizar un dosímetro de película para revisar su exposición a la radiación ionizante cada semana.*
- 10) Se debe tener presente que la contaminación radiactiva puede ser removida de los plásticos, metales y vidrios pero es difícil removerla de materiales porosos tales como madera, papel o tabiques.*
- 11) Cuando se calienten o se evaporen soluciones radiactivas, usar las campana de extracción del laboratorio.*

1.8.- Técnicas de detección y cuantificación de la radiación⁽³⁹⁻⁴²⁾

Como la radiación pierde su energía en la materia produciendo principalmente ionizaciones y excitaciones de los átomos y moléculas del material, es posible que, utilizando esta propiedad de la radiación, detectar su existencia y cuantificarla.

La radiación emitida por un radioisótopo puede detectarse por medio de detectores de Centelleo, Geiger-Muller o algún otro tipo de detector. En igualdad de condiciones de medida, la sensibilidad de un detector de centelleo suele ser mucho mayor que un Geiger-Muller.

Debido al precio elevado del radiotrazador y a los eventuales riesgos derivados de su empleo, en la práctica es muy importante utilizar actividades tan bajas como sea posible. Por este motivo se recurre a técnicas de medida de elevada sensibilidad.

1.9.- Fuentes radiactivas⁽⁴³⁾

Los núcleos pueden transformarse unos en otros, o pasar de un estado energético a otro mediante la emisión de radiaciones. Se dice entonces que los núcleos son radiactivos, y el proceso que sufren se denomina decaimiento radiactivo o desintegración radiactiva.

Esta transformación o decaimiento sucede de manera espontánea en cada núcleo, sin que pueda impedirse o modificarse mediante algún factor externo (cada decaimiento va acompañado por la emisión de al menos un tipo de radiación).

La energía que lleva cada radiación es perdida por el núcleo, siendo la fuerza nuclear el origen de esta energía y lo que da a las radiaciones sus dos características más útiles: poder penetrar la materia y capacidad de depositar su energía en ella. No todos los núcleos de la naturaleza son radiactivos. El decaimiento nuclear sólo sucede cuando hay un exceso de masa-energía en el núcleo, la emisión de radiación le ayuda entonces a lograr una mayor estabilidad. Los decaimientos radiactivos de los diferentes núcleos se caracterizan por el tipo de emisión, por su energía y por la vida media de la desintegración radiactiva.

1.10.- Tipos de decaimiento radiactivo.

Sólo hay un limitado número de maneras en que los núcleos pueden decaer, si bien cada tipo de núcleo tiene su propio modo de decaimiento.

A continuación se describen los más importantes:

1.- **Decaimiento alfa (α).** Un grupo importante de elementos pesados pueden decaer emitiendo partículas α que consisten de un agregado de dos protones y dos neutrones. Estas partículas son idénticas a núcleos de Helio (${}^4_2\text{He}$), por lo que su carga es +2 y su número de masa es 4.

Cuando un núcleo emite una partícula α pierde 2 unidades de carga y 4 de masa, transformándose en otro núcleo, como lo indica el siguiente ejemplo.



2.- **Decaimiento beta (β).** Hay dos tipos de decaimiento β , el de la partícula negativa y el de la positiva.

La partícula β negativa que se emite es un electrón, con su correspondiente carga y masa, indistinguible de los electrones de las capas atómicas. En vista de que los núcleos no contienen electrones, la explicación de esta emisión es que un neutrón del núcleo se convierte en un protón y un electrón, el protón resultante permanece dentro del núcleo en virtud de la fuerza nuclear, y el electrón escapa como partícula β . El número de masa, del núcleo resultante es el mismo que el del núcleo original, pero su número atómico se ve aumentado en uno, aumentando así la carga. El siguiente caso es un ejemplo de decaimiento beta negativa.



Cabe mencionar que en cada decaimiento β se emite también otra partícula: el neutrino. Esta partícula no tiene carga y presenta masa despreciable, razón por la cual no afecta el balance de la ecuación anterior. Por esa razón, no se incluyen en la ecuación, sin embargo, se llevan parte de la energía total disponible en el proceso, quedando la partícula β con la mayor parte.

Algunos núcleos emiten partículas β positivas (positrones), que tienen la misma masa que los electrones y carga $+e$, o sea una carga electrónica pero positiva. Estas partículas son las antipartículas de los electrones y se crean en el núcleo cuando un protón se convierte en un neutrón.

El nuevo neutrón permanece en el núcleo y el positrón (junto con un antineutrino) es emitido. En consecuencia, el núcleo pierde una carga positiva, como lo indica el siguiente ejemplo:



3.- **Decaimiento gamma (γ).** Los rayos γ son fotones o paquetes de radiación electromagnética de la misma naturaleza que la luz visible, la ultravioleta, la infrarroja, los rayos X, las microondas y las ondas de radio. No tienen masa ni carga, y solamente constituyen energía emitida en forma de onda. En consecuencia, cuando un núcleo emite un rayo γ , se mantiene como el mismo núcleo pero en un estado de menor energía.

4.- **Captura electrónica (E).** En ciertos núclidos es posible otro tipo de decaimiento: la captura electrónica. En este caso, el núcleo atrapa un electrón orbital, de carga negativa y en consecuencia uno de sus protones se transforma en un neutrón, disminuyendo así su número atómico.

El electrón atrapado por el núcleo generalmente proviene de la capa K, dejando una vacante. Para llenar esta vacante, cae un electrón de una capa exterior (L, M, etc.) emitiendo de manera simultánea un fotón de rayos X. El proceso total se identifica por los rayos X emitidos al final, que son característicos del nuevo átomo, como lo muestra el siguiente ejemplo:



Hay otros procesos de menor importancia que también implican decaimiento radiactivo, transmutación de elementos y emisión de alguna radiación característica, como los electrones por conversión interna (e^-) y electrones Auger. Por otro lado, si se cuenta con un acelerador de partículas o un reactor nuclear, se puede inducir un gran número de reacciones nucleares acompañadas por sus consiguientes emisiones. De hecho, en la gran mayoría de las fuentes radiactivas que se usan en la actualidad, la radiactividad ha sido inducida por bombardeo con neutrones provenientes de un reactor nuclear.

1.11.- Energías de decaimiento.

La segunda propiedad que caracteriza al decaimiento radiactivo de cada núclido es la energía de la radiación emitida. Esta energía está dada por la diferencia entre los niveles involucrados en el decaimiento. Como los núcleos sólo pueden existir en niveles de energía fijos, se dice que

su energía esta cuantizada, se deduce que la energía de decaimiento entre dos estados dados es siempre la misma. Esta energía puede incluso servir para identificar el nucléido.

Las radiaciones α y γ cumplen con la regla de ser monoenergéticas si provienen de un sólo tipo de decaimiento. Sin embargo, la β debe compartir la energía disponible con el neutrino y antineutrino, por lo que tiene un espectro continuo de energía. Las radiaciones nucleares tienen normalmente energías del orden de MeV (un millón de veces la energía adquirida por un electrón cuando es acelerado por una diferencia de potencial de 1 Volt).

1.12.- Ley de decaimiento radiactivo.

La tercera propiedad característica de la desintegración radiactiva es su vida media. Un nucléido al desintegrarse se transforma en otro y por lo tanto desaparece. Si el proceso es rápido, la cantidad de núclidos originales disminuye muy rápido. Si el proceso es lento, puede durar mucho tiempo, hasta miles de millones de años.

Supóngase que se tiene una muestra con un número dado N de núcleos radiactivos. La actividad A , o sea la emisión de radiación por unidad de tiempo, es proporcional al número N presente en cada instante, por lo que:

$$A = -\lambda N \quad (1.8)$$

La cantidad λ se llama constante de decaimiento, y es característica de cada radioisótopo. Representa la probabilidad de que haya una emisión en un lapso dado.

De acuerdo con la fórmula, para un valor dado de N , la actividad es mayor o menor en magnitud según si λ es grande o pequeña.

La actividad A se mide en desintegraciones por unidad de tiempo. Las unidades de actividad aceptadas internacionalmente es el Becquerel (Bq), que equivale a 1 desintegración por segundo y el Curie (Ci) que equivale a 3.7×10^{10} desintegraciones por segundo.

Dado que la actividad de una muestra radiactiva que posee un solo tipo de radioisótopo, esta dada por la ecuación:

$$A = -\lambda N \quad (1.9)$$

y como la actividad implica transmutación nuclear, al ir decaendo la muestra con el tiempo, el número N va disminuyendo con una rapidez $\frac{dN}{dt}$.

$$A = -\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1.10)$$

El signo negativo indica disminución de N , al avanzar el tiempo t . Por tanto:

Si tomamos la segunda parte de esta ecuación, se obtiene la siguiente ecuación diferencial

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (1.11)$$

Integrando ambos miembros.

$$\int \frac{dN}{N} = \int (-\lambda dt)$$

Resolviendo la integral, se obtiene

$$\text{Ln}N = -\lambda t + C \quad (1.12)$$

donde C es la constante de integración y Ln indica el logaritmo natural.

Si se toma la exponencial en ambos miembros, recordando que la función exponencial es la inversa del logaritmo natural, la ecuación toma la siguiente forma:

$$N = e^{-\lambda t + C} = e^{-\lambda t} e^C \quad (1.13)$$

Para encontrar la constante de integración C , se supone que al iniciar el proceso de decaimiento ($t = 0$) el valor de N es N_0 . Sustituyendo estos valores en la ecuación

$$N_0 = e^C \quad (1.14)$$

Por lo tanto,

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.15)$$

es la ley de decaimiento radiactivo e indica la forma exponencial en que el número de núcleos disminuye con el tiempo.

La actividad correspondiente se obtiene con:

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.16)$$

Si se define $A_0 = \lambda N_0$ como la actividad inicial de la muestra, la ecuación anterior toma la forma:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.17)$$

es decir, la actividad disminuye en el tiempo siguiendo también una ley de tipo exponencial.

1.13.- Vida media de una fuente radiactiva.

Para representar la duración de las fuentes radiactivas se ha definido el concepto de vida media, $t_{1/2}$, y se define como el tiempo que tarda en reducirse a la mitad la actividad de dicha fuente. La vida media es una característica intrínseca de un radioisótopo y es diferente para cada radioisótopo. Por lo que para identificarlo, generalmente es suficiente con conocer su vida media.

Dado que la constante de decaimiento λ representa la probabilidad de desintegración, por lo tanto se espera que si λ es grande, la vida media es corta y viceversa, o sea que hay una relación inversa entre la constante de decaimiento y la vida media. Esta relación se determina de la siguiente manera: la vida media de $t_{1/2}$ de un isótopo es el tiempo que tarda en disminuir su actividad a la mitad. Si en la ecuación de decaimiento se sustituyen los valores cuando $t = t_{1/2}$, es decir, $A = \frac{A_0}{2}$ se obtiene que :

$$A_0 / 2 = A_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \quad (1.18)$$

Eliminando A_0 :

$$A_0 / 2 = A_0 / e^{\lambda t_{1/2}}$$

y tomando el inverso

$$2 = e^{\lambda t_{1/2}}$$

tomando el logaritmo natural en ambos miembros.

$$\text{Ln}2 = \text{Lne}^{\lambda t_{1/2}}$$

es decir,

$$\text{Ln}2 = 0.693 = \lambda t_{1/2} \quad (1.19)$$

De aquí se obtiene la relación entre la constante de decaimiento y la vida media de un isótopo :

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1.20)$$

Concluimos que cada núcleo tiene su vida media propia, y ésta es otra cantidad que no puede ser alterada por ningún factor interno.

En la tabla 1.1 se muestra la vida media de algunos radioisótopos importantes que pueden ser utilizados como radiotrazadores.

Tabla 1.1.-Vida media de algunos radioisótopos que pueden ser utilizados como radiotrazadores

RADIOISOTOPO	VIDA MEDIA	RADIOISOTOPO	VIDA MEDIA
^3H	12.6 años	^{137}Cs	30 años
^{14}C	5730 años	^{210}Po	138 días
^{22}Na	2.6 años	^{170}Tm	134 días
^{32}P	14.3 días	^{169}Yb	32 días
^{40}K	1.3×10^9 años	^{192}Ir	74 días
^{60}Co	5.24 años	^{223}Rn	3.82 días
^{90}Sr	28.8 años	^{226}Ra	1620 años
^{124}Sb	60.4 días	^{235}U	7.13×10^8 años
^{129}I	1.6×10^7 años	^{238}U	4.51×10^9 años
^{131}I	8.05 días	^{239}Pu	24360 años
^{241}Am	458 años	^{252}Cf	2.7 años

En particular, el radiotrazador ^{22}Na tiene los siguientes parámetros :

- Tipo de energía de la radiación: rayos γ de 0.511 y 1.275 MeV fácilmente detectables.
- Vida media de 2.6 años.
- Actividad específica suficiente que le permite grandes disoluciones.
- Pureza radioquímica, o sea la ausencia de otras radiactividades que pudieran deformar el estudio debido a la presencia de impurezas o hijos radiactivos.

1.14.- Absorción y Adsorción⁽⁴⁴⁾

A mediados del siglo XVIII se observó que en las interfases de un sistema, la concentración de sustancia en la superficie es mayor que en el volumen total. Sin considerar la magnitud y las características de las fuerzas que lo originan, a este fenómeno (posteriormente) se le llamó Sorción y a la sustancia en la cual se efectúa dicho fenómeno Sorbente. Las investigaciones detalladas mostraron que la sorción abarca un grupo de fenómenos entre los cuales los más importantes son: absorción y adsorción.

La absorción se refiere al proceso que tiene lugar en el volumen del sorbente (por ejemplo, la disolución de un gas en el volumen de un líquido) y la adsorción se refiere al proceso que se lleva a cabo en la superficie del sorbente.

De hecho, la adsorción es un fenómeno que consiste en la adhesión de una sustancia adsorbida a la superficie de otra, que es la sustancia adsorbente.

La producción de este fenómeno se explica de la siguiente manera: la sustancia adsorbente tiene una estructura iónica, en la que las cargas de los iones interiores se neutralizan entre sí, no sucediendo lo mismo con las cargas de iones superficiales, los cuales pueden atraer o repeler a otros iones.

En general, la sustancia adsorbida queda formando una capa monomolecular que cubre la superficie adsorbente y por lo tanto, las cantidades de sustancia adsorbida son muy pequeñas.

En efecto: el diámetro de una molécula $\approx 10^{-7}$ cm. Por lo tanto, el área del círculo máximo de una molécula $\approx 10^{-14}$ cm² y en consecuencia, en 1 cm² caben aproximadamente 10^{14} moléculas, por otro lado el peso de una molécula es igual

$$\frac{\text{peso molecular}}{\text{Número de Avogadro}}$$

Por ejemplo si una mol ≈ 100 g. resulta que el peso de una molécula:

$$\approx \frac{100}{6 \times 10^{23}} \approx 10^{-22} \text{ g}$$

*Por lo tanto, el peso de una sustancia adsorbida en $1 \text{ cm}^2 \approx 10^{14} * 10^{-22} \approx 10^{-8} \text{ g}$.*

Esta cantidad de sustancia adsorbida no es determinable por los métodos más sensibles de medición que se conocen. Sin embargo, el uso de radioisótopos si permite medir cantidades tan pequeñas y aún menores que la anterior, por medio de la detección de las radiaciones emitidas.

CAPITULO 2

IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LA MIGRACION DE SALES EN MATERIALES DE CONSTRUCCION PREHISPANICA.

2.1.- Antecedentes de la zona arqueológica de Tula, Hidalgo⁽⁴⁵⁾.

La zona arqueológica de "TULA" se encuentra colindando con el lado Norte del actual poblado de Tula de Allende, en el Estado de Hidalgo, a 80 Km del Distrito Federal y a 2030 m sobre el nivel del mar.

Esta zona fue un centro ceremonial Tolteca. Con base en los estudios arqueológicos[46] y a los materiales obtenidos en las exploraciones ha sido posible establecer dos periodos de esta cultura: el tolteca antiguo y el tolteca reciente.

El tolteca antiguo tuvo lugar de 750 a 950 DC, caracterizándose por las cerámicas de "Coyotlatelco" y "Esgrafiada", su transición fue militar y religiosa.

El tolteca reciente fue de 950 a 1200 DC, caracterizándose por la cerámica "naranja a brochazos" y "naranja sellada", su transición termina violentamente hacia 1200 DC cuando la ciudad es destruida e incendiada, los edificios consumidos por el fuego y los chacmooles decapitados.

Sus actividades económicas fueron la explotación e intercambio de obsidiana, el tallado de alabastro, el labrado de basalto y el tallado sobre losas de toba volcánica.

Los talleres de obsidiana se localizaron en los alrededores del Cielito, en las calles de Quetzalcoatl en Tula y al Sur del Museo Jorge R. Acosta.

De los talleres de tecali (alabastro), se han localizado abundantes deshechos al Noroeste del Museo, los talleres de labrado de basalto se localizaron en acantilados cercanos al rio Tula y Rosas, al Poniente del juego de pelota número 2 (figura 2.1), así como los del tallado de losas de toba volcánica en Michimaloya, Xitejé y San Miguel de las Piedras. Así mismo, la industria de la cal era otra actividad importante, ya que se han localizado hornos que servían para quemar la

piedra caliza, con la cual preparaban el estuco (mezcla de cal y arena con acabado fino o liso) con el que revocaban sus construcciones, hacían pisos y unían piedras.

En este sentido, los centros ceremoniales y ciudades con arquitectura monumental prehispánica en el área de Tula fueron construidos a base de adobes, en donde el núcleo está formado por capas de piedra sin argamasa hasta llegar al volumen deseado, para después levantar muros en talud y tableros con piedras y barro colocado sobre ellos. Las losas están esculpidas con bajorrelieves representando dioses, guerreros o animales relacionados con el culto, así mismo jaguares o águilas que devoran corazones (Figura 2.2).

Su técnica de construcción más simple fue emplear para los muros, tepetate como mortero y lodo con aplanados de cal.

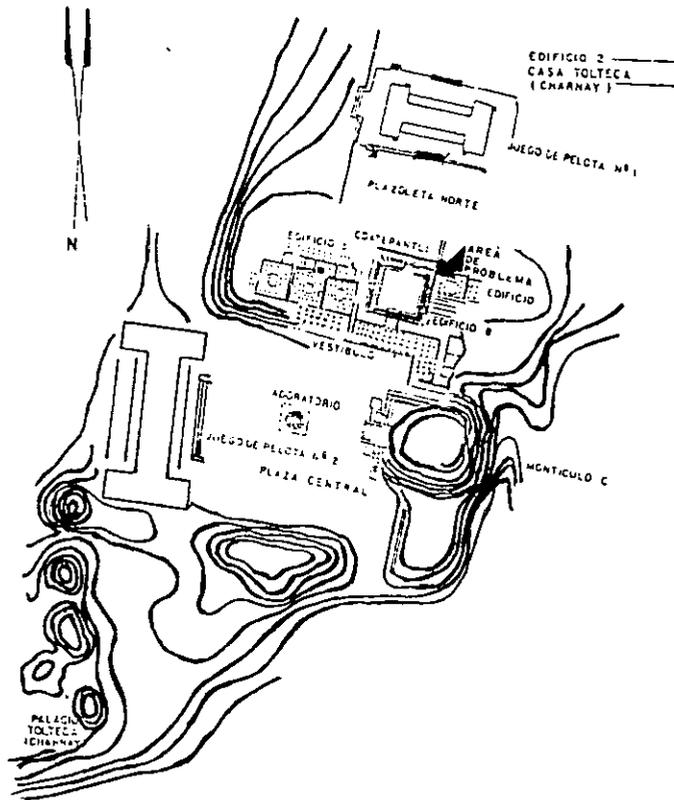


Figura 2.1.- Plano de la zona arqueológica de TULA, Hidalgo.

Una descripción más completa nos la da Marquina[47], incluyendo el edificio "B", lugar donde se realizó el muestreo, que fue descubierto en el año de 1940. Este edificio fue un templo dedicado a Quetzalcoatl, llamado también Tlahuizcalpantecutli, que es una pirámide escalonada de cinco cuerpos, cuya base, casi cuadrada, tiene aproximadamente 38 m de lado por 10 m de alto. El edificio pasó por una serie de reconstrucciones y superposiciones que habían ido apareciendo en el transcurso de la exploración, ya que sobre el núcleo de piedra y lodo se formaron taludes poco inclinados en los cuales se dejaron piedras salientes, para fijar con revestimiento de piedra labrada, del que sólo una parte se conserva en la parte poniente. Cada cuerpo se compone de este revestimiento formando un talud que mide 55 a 60 cm, una parte vertical de 70 cm decorada con tableros distribuidos a distancias iguales, sobre un friso de la misma altura comprendido entre dos fajas salientes de manera que la altura de cada cuerpo varía entre 1.80 m y 2.00 m. La piedra está cubierta por un aplanado de cal tan grueso que casi hace desaparecer la saliente de las molduras.

Las exploraciones arqueológicas de los años 1942 y 1945 permitieron descubrir el Coatepanlti y las losas decoradas con bajorrelieves, en donde el muro fue encontrado desplomado y con una parte de las losas caídas. Se procedió a su reconstrucción, utilizando para ello una revoltura de cemento para hacer una costra de cinco centímetros de espesor, vaciada sobre la parte posterior de las losas y ya endurecida, se procedió a empotrar sobre el muro, donde posteriormente fueron juntas con más cemento. Posteriormente, en la sexta séptima temporadas de trabajo de campo, el equipo de arqueología, al descubrir los cuerpos inferior y superior del edificio "B" con las losas decoradas con bajorrelieves, se mencionó que el estado de conservación era bueno y se describe una primera intervención de ensayo[48].

2.2.- Naturaleza del problema.

En 1981, en visita de inspección a la zona arqueológica de Tula, el Sr. Baltazar Trejo, restaurador expresó en su informe[49] la necesidad de restaurar los tableros con bajorrelieves. En otra visita de inspección a esta zona realizada en 1988[50] se tomaron muestras de pigmentos y rocas para su análisis, se hizo una descripción del estado de conservación del

edificio "B", así como de los tableros adosados y se vuelve a recomendar la restauración de los tableros; dichas recomendaciones no se siguieron.

En 1991, la sección de Arqueología del centro regional Hidalgo, en una visita de inspección al mismo edificio emite la siguiente opinión: "Consideramos que el actual estado de conservación y grado de deterioro de los bajo relieves de Tula evidencian un alto deterioro especialmente los correspondientes al conjunto arquitectónico conocido como sistema "B", que incluye el "Palacio Quemado" así como al edificio "B" en donde muestran un mosaico de deterioros tanto por el medio ambiente como por su propia naturaleza", haciendo algunas propuestas de restauración.

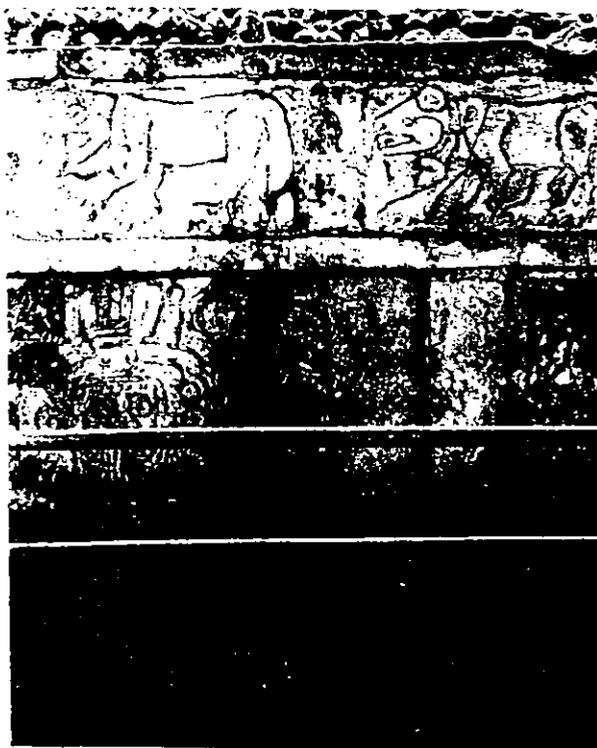


Figura 2.2.- Detalle del bajo relieve del edificio B. Se puede apreciar la representación de dioses, guerreros o animales relacionados con el culto.

Por otro lado, la Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía expresó su preocupación por la gravedad del avance del deterioro de los bajorrelieves de la zona arqueológica de Tula, principalmente en el Tlahuizcalpanteculli, haciendo también algunas propuestas de restauración.

Las propuestas realizadas por las diferentes dependencias se pueden resumir en las siguientes tres propuestas:

- a) Investigación de los agentes de deterioro y análisis de los materiales pétreos.*
- b) Remover los bajo relieves de su sitio, aplicarles un tratamiento de consolidación individual y reconstruir los tableros dentro del museo, colocando en su lugar original réplicas en otro material.*
- c) Mantener los bajo relieves en su sitio actual, aplicándoles un tratamiento de consolidación, aislándolos de la estructura del basamento y crear allí un espacio cerrado que le aisle del medio ambiente.*

Las dos últimas propuestas implican serios riesgos. En la segunda, dada la gravedad de la degradación de la piedra por un lado y de las intervenciones de reforzamiento con cemento, realizadas en el pasado, el proceso de remoción puede provocar la pulverización de los bajo relieves por lo cual habría que realizar previamente su consolidación.

En la tercera, el riesgo principal es el de que, por los métodos tradicionales no hay garantía de la penetración completa del consolidante ya sea de origen inorgánico u orgánico, ni manera de comprobarlo. No obstante existe una posibilidad de tratamiento de consolidación que ofrece técnicamente la garantía de una penetración completa siendo el método llamado impermeabilización y estabilización iónica que consiste en la introducción de sales en solución acuosa inducida por una corriente eléctrica que se produce mediante dos electrodos colocados en el interior de material a tratar.

En tanto que en la primera, implica realizar una investigación detallada de los materiales y de los agentes de deterioro; dicha acción puede realizarse con técnicas científicas adecuadas. Además, este punto resulta ser el más importante por que según los resultados que se obtengan, los dos últimos puntos se realizarán adecuadamente.

Por otro lado, por las investigaciones ya realizadas en materiales de construcción, se sabe que uno de los principales agentes de deterioro lo representa el proceso de migración al exterior de sales solubles presentes en el interior de los materiales. Este proceso sucede cuando el agua de lluvia corre a través y por encima de la estructuras provocando la disolución de sales por fenómenos físicos de absorción, difusión y capilaridad, las cuales se precipitan en los poros de los materiales pétreos formando hidratos que por medio de ciclos de cristalización y recristalización por efectos de la evaporación forman agregados microcristalinos de estructura porosa, que promueven el flujo de mayores cantidades de solución en el interior y aunado a la humedad relativa del aire se hidratan provocando una expansión volumétrica que presiona las paredes de los poros dando como resultado esfuerzos mecánicos intensos y reacciones químicas al hidrolizarse. Como resultado se tiene un rompimiento en forma de exfoliación (capas laminares) y de burbujas (estallamientos) haciendo que el material se disgregue en forma parcial o total (figura 2.3); problema que se ha observado en los bajo relieves del edificio B.

Para resolver este problema es importante primero conocer el tipo de sales presentes que son las que migran hacia el exterior y el proceso como lo realizan.

Como se mencionó líneas arriba, la caracterización de las sales se pueden realizar por técnicas científicas tales como microscopia electrónica de barrido y difracción de rayos X. Pero el estudio del proceso de migración es más complicado por la dificultad que presentan estos materiales. En tal caso, se sugiere como método más adecuado, el de radiotrazadores por las facilidades que presenta este método para problemas de esta naturaleza.

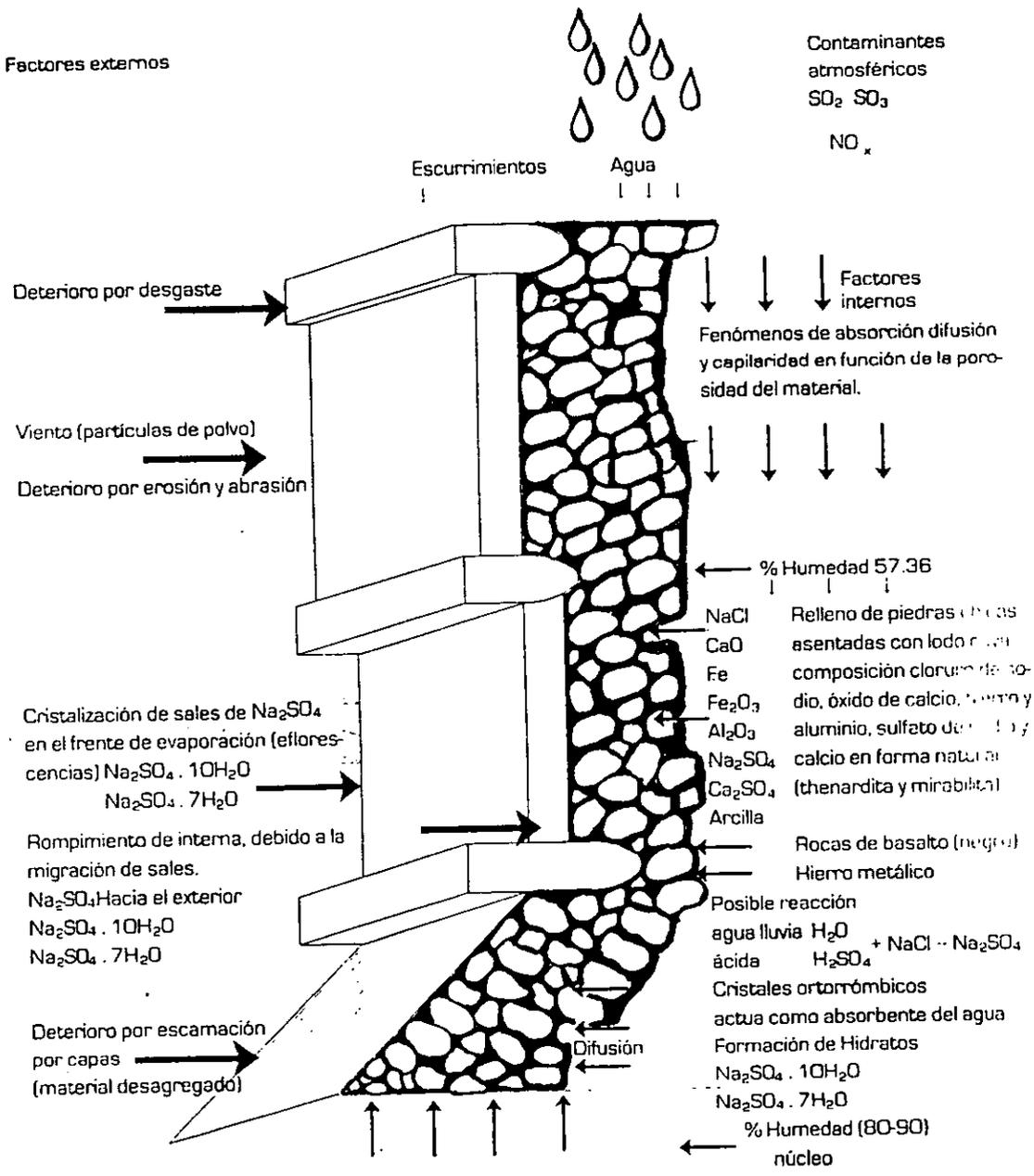


Figura 2.3.- Mecanismo de deterioro.

CAPITULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1.- Muestreo

Una de las partes más importantes de esta investigación es el muestreo, pues si la muestra no representa la totalidad de lo que se deseé analizar, aunque el método o técnica de estudio sea válido los resultados estarán distorsionados.

Existen básicamente cuatro métodos para elegir los sitios de muestreo[51]

- 1.- Juicio personal
- 2.- Aleatorio simple
- 3.- Sistemático
- 4.- Aleatorio complejo.

Para este estudio se eligió el método de juicio personal, el cual es una manera de elegir los sitios de muestreo que dependen completamente del criterio de la persona que los efectúa, quien debe conocer la zona del problema de estudio, en donde se escogen las áreas representativas del deterioro. En este caso fueron los bajorrelieves adosados al edificio B lado norte y este de la zona arqueológica de Tula (Figura 3.1)

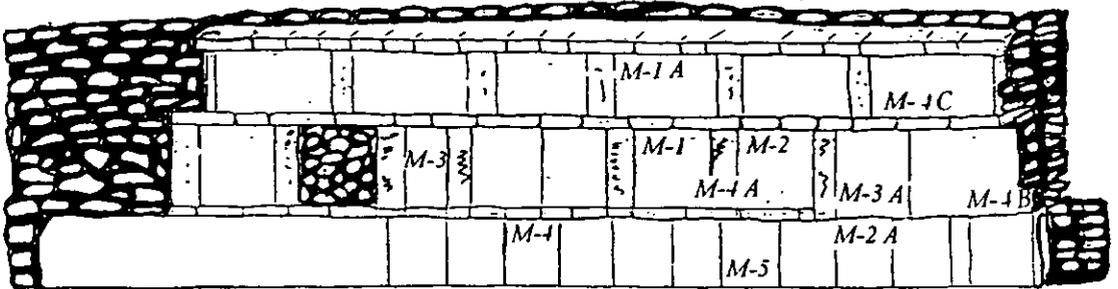


Figura 3.1.- Zona de muestreo en los bajo relieves.

Tomando en cuenta lo anterior, se llevó a cabo el muestreo de todas las sales que afloraban en la superficie de los bajorrelieves, colocándolas en recipientes de vidrio sellados herméticamente para evitar la deliscuencencia de las sales, asimismo se tomaron muestras de fragmentos de roca que conforman los bajorrelieves las cuales se seleccionaron con base en su deterioro, coloración y posición. En las figuras 3.2 y 3.3 se presentan las imágenes correspondientes a estas muestras, en tanto que el la tabla 3.1 se dan algunas de sus características.

Tabla 3.1.-Características de las muestras tomadas para su análisis.

MUESTRA	DESCRIPCIÓN
<i>M-1</i>	<i>Roca de color naranja rojiza con estuco y húmeda</i>
<i>M-1A</i>	<i>Roca de color naranja rojiza sin estuco y húmeda</i>
<i>M-2</i>	<i>Roca de color naranja con estuco</i>
<i>M-2A</i>	<i>Roca de color naranja con estuco y húmeda</i>
<i>M-3</i>	<i>Roca de color café</i>
<i>M-3A</i>	<i>Roca de color café</i>
<i>M-4</i>	<i>Roca de color amarillo rojiza</i>
<i>M-4A</i>	<i>Roca de color amarillo rojiza</i>
<i>M-4B</i>	<i>Roca de color amarillo rojiza</i>
<i>M-4C</i>	<i>Roca de color amarillo rojiza</i>
<i>M-5</i>	<i>Sales depositadas sobre los bajo relieves</i>

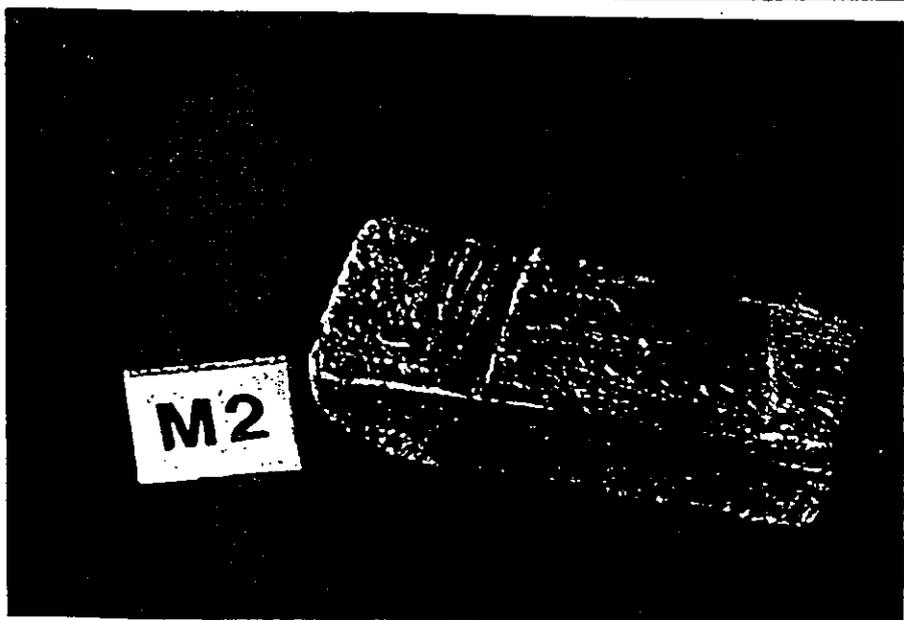
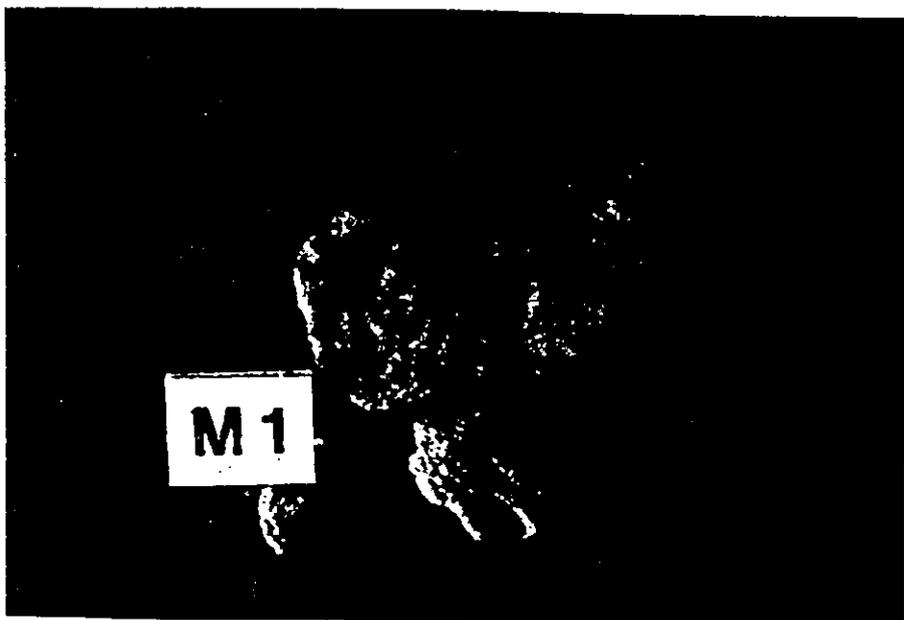


Figura 3.2.- Imágenes de las muestras correspondientes a los bajo relieves del edificio B de Tula.

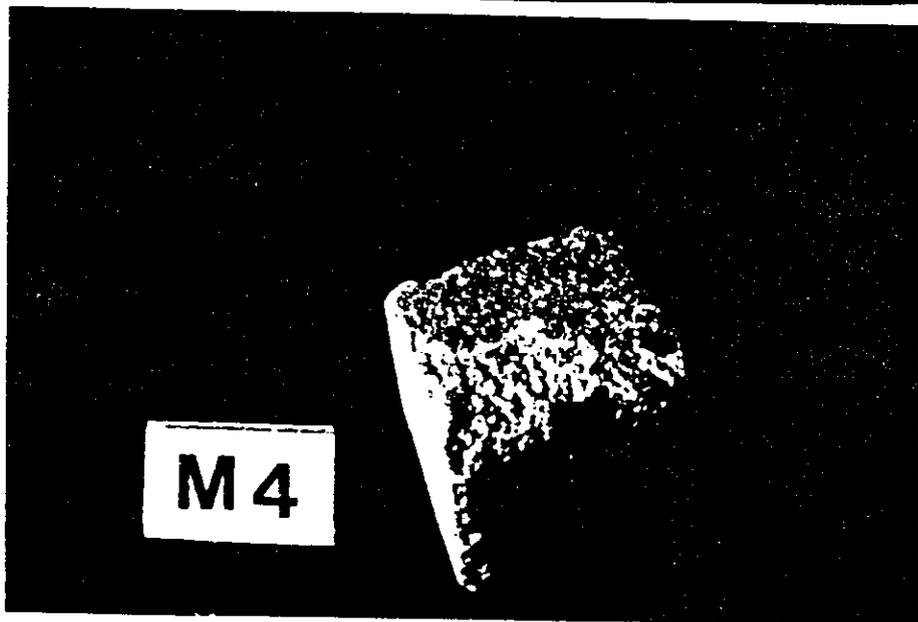
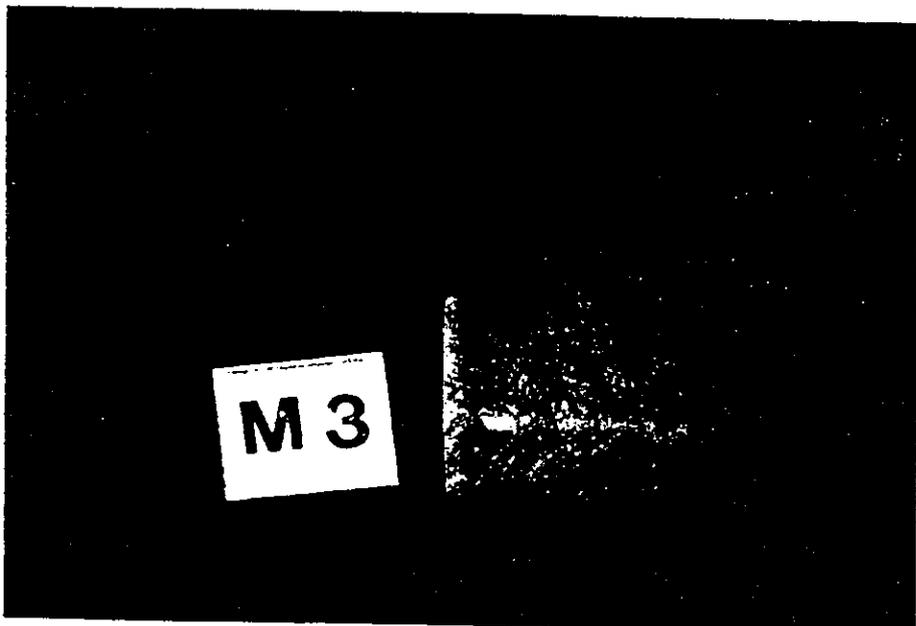


Figura 3.3.- Imágenes de las muestras correspondientes a los bajo relieves del edificio B de Tula.

3.2.- Caracterización por diferentes técnicas

Una vez realizado el muestreo, fue necesario caracterizar las muestras para identificar las sales presentes, de tal manera que al identificar las sales se pudiera decidir el tipo de radiotrazador a utilizarse. En este caso, se utilizó la microscopía electrónica analítica de barrido, que es una técnica que permite hacer un análisis de la morfología y composición química elemental de las muestras. También se utilizó la técnica de difracción de rayos X, que permite determinar las fases cristalinas presentes; ambas técnicas son no destructivas. A continuación se hace una breve descripción de éstas.

3.2.1.- Microscopía Electrónica Analítica de Barrido.

A partir de esta técnica es posible obtener información sobre la morfología de las muestras de roca dentro de una región menor a una micra ($1\ \mu\text{m} = 10^{-6}\ \text{m}$). Y la técnica consiste en la interacción de un haz de electrones que barre totalmente la superficie de la muestra y que al chocar contra ella, el haz de electrones produce los siguientes procesos (figura 3.4) :

- (a) Electrones retrodispersados.
- (b) Electrones secundarios
- (c) Electrones absorbidos
- (d) Rayos X característicos y electrones Auger.

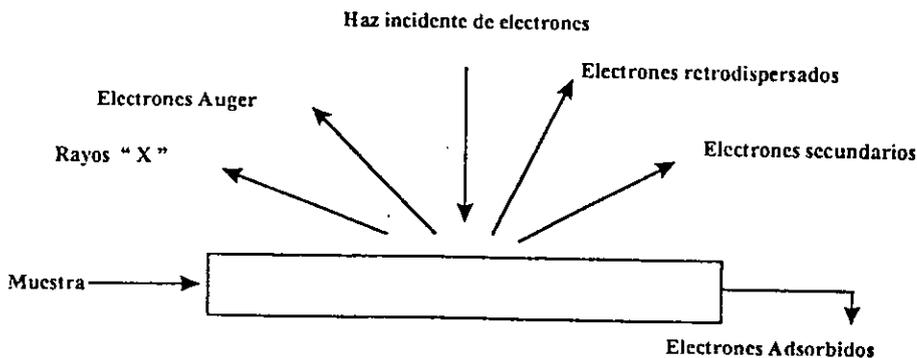


Figura 3.4.- Esquema de los procesos de interacción de los electrones en la superficie de un material

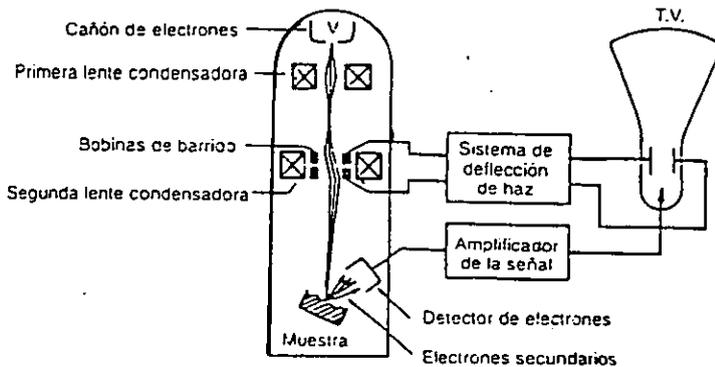
Cada uno de ellos nos proporciona diferente información al aplicar sobre diversas zonas de la muestra, obteniéndose variaciones en la intensidad de los electrones retrodispersados a un ángulo dado (ángulo de observación) y el resultado será una imagen de la topografía superficial de la muestra.

A esta modalidad de microscopía electrónica se le puede acoplar alguna técnica de espectroscopia tal como de espectroscopia por dispersión de energía de rayos "X" (EDS).

Cuando éste es el caso, se dice que se está trabajando con un microscopio electrónico analítico de barrido.

En este estudio se utilizó un Phillips XL-30 (resolución máxima de 3.5 nm) instalado en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

La figura 3.5 muestra el diagrama correspondiente al equipo de microscopía electrónica analítica de barrido.



SEM, Philips XL30

Figura 3.5.- Diagrama del Microscopio Electrónico.

Para realizar la caracterización por esta técnica, las muestras de origen pétreo se montaron sobre portamuestras de aluminio con doble cinta de carbón y otras muestras fueron colocadas con pintura de plata. Una vez montadas, se les evaporó una delgada capa de oro por el método de sputtering, evitando de esta manera la carga electrostática producida por la interacción de haz electrónico con la muestra. La observación se realizó a 25 Kv y 30 Kv con señales de electrones secundarios. Los espectros de dispersión de energía (EDS) se obtuvieron de manera local y puntual en diferentes zonas representativas de las muestras.

3.2.2.- Difracción de rayos X.

Con esta técnica es posible obtener información estructural o anisótropa (estado cristalino), aprovechando la difracción, que es el cambio de dirección de la radiación incidente por una disposición determinada de puntos, líneas o superficies. La línea resultante del espectro es característica de la naturaleza química del blanco, ya que son los niveles de energía.

En este estudio se utilizó un difractómetro de polvos modelo Siemens D5000 instalado en el ININ. El equipo operó con un haz de rayos X de 30 KeV y una corriente de 20 mA, haciendo un barrido de 2° a 70 °, con pasos de 0.1. Las muestras fueron pulverizadas en un mortero de ágata y colocando el polvo fino sobre un portamuestras amorfo de manera compacta para tener así una mayor recolección de señales de las diferentes direcciones de los cristales.

3.3.- Aplicación del método de radiotrazadores

Una vez identificadas las sales presentes en las muestras, a partir de las técnicas antes descritas, se procedió a aplicar el método de radiotrazadores para hacer el seguimiento de la migración de estas sales a través de muestras de piedra, y con base en este resultado se seleccionó el trazador más adecuado.

Para llevar a cabo la absorción del radiotrazador, es necesario primero hacer una descripción detallada tanto del equipo como del proceso que se llevó a cabo para efectuar la detección con el radioisótopo seleccionado, el cual fue expresamente adicionado a una solución de sulfato de sodio para ser absorbido en muestras de piedra, a fin de verificar las modalidades de la migración de los iones de sodio en el interior de estos materiales.

La técnica de medida empleada en este estudio fue con un detector de centelleo de pozo y con cristal de yoduro de sodio y talio (NaI/Tl). Este tipo de detector fue seleccionado con base en el tipo de radiación que emite el radiotrazador seleccionado, el cual fue el ^{22}Na , como se explicará más adelante. Este detector consiste de un orificio cilíndrico en cuyo interior se introduce la muestra a medir, ya que esta disposición geométrica proporciona una eficacia de medida muy elevada, porque la mayor parte de los rayos gamma emitidos por la muestra inciden sobre el cristal.

Asimismo, se utilizó un miniescalador MS-2 Eberline para el conteo de las señales emitidas por el detector a través de un analizador monocanal de pulsos.

La calibración del equipo de detección se realizó de la siguiente manera : para un voltaje fijo de operación del detector (800-900 V, correspondientes a un valor de la escala de control de 1.9), y una abertura fija de la ventana (5%), formada por dos discriminadores de pulsos, se detectaron siete muestras estándar emisoras gamma de energías conocidas. Cada muestra es detectada de manera óptima en un nivel específico del umbral de la ventana, de modo que trazando una gráfica de energía de los rayos gamma detectados contra la posición del umbral, disponemos de un medio para establecer las condiciones de operación de nuestro equipo de detección para cualquier radioisótopo emisor de rayos gamma que esté dentro del intervalo de energías (figura 3.6).

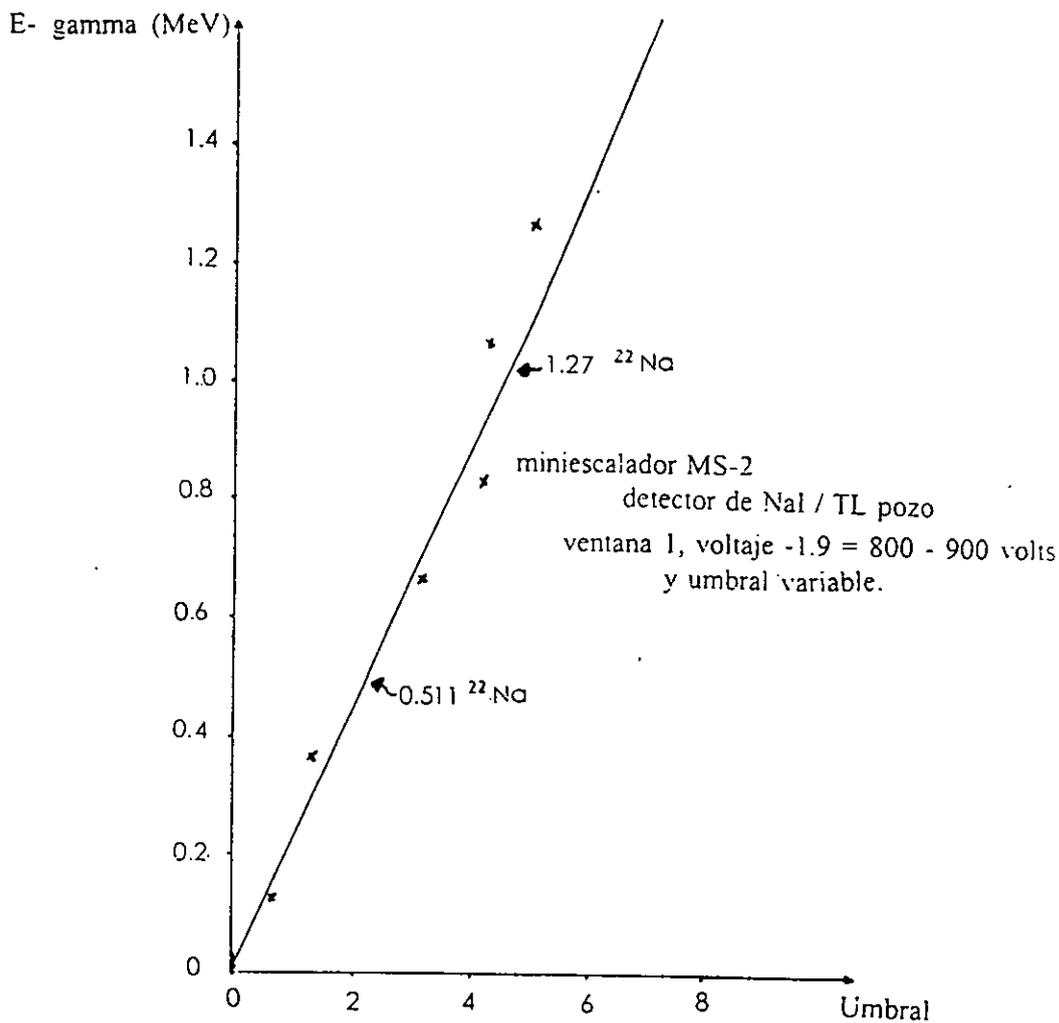


Figura 3.6.- Gráfica de calibración de equipo de detección.

3.4.- Procedimiento de absorción del radiotrazador.

La preparación de las muestras de piedra correspondientes a los bajo relieves, fueron cortadas en forma cilíndrica de 10 cm de alto y 3 cm de diámetro, así mismo se preparó una solución de Na_2SO_4 al 10% a la cual se le agregaron 2 ml del de una solución que contenía el radiotrazador seleccionado, el cual fue el ^{22}Na , como se explicará en siguiente capítulo.

De esta solución marcada se tomaron 10 ml, que se colocaron sobre una charola de plástico con compartimientos cuadrados en donde en cada cuadro se colocó una muestra de piedra para que se llevará a cabo la absorción de la solución marcada. En este caso, la solución inicialmente cubrió 0.5 cm de la muestra, a partir de la parte inferior. El proceso de absorción se llevó a cabo en 24 horas.

Una vez que las muestras absorbieron por capilaridad la solución marcada se dejaron secar, observándose en la parte superior las eflorescencias de color blanco, se procedió a la detección de la radiactividad emitida en cuatro puntos geométricos de las muestras (inferior, lateral inferior, lateral superior y superior, figura 3.7) por medio del detector de centelleo (pozo) acoplado a un sistema electrónico de conteo.

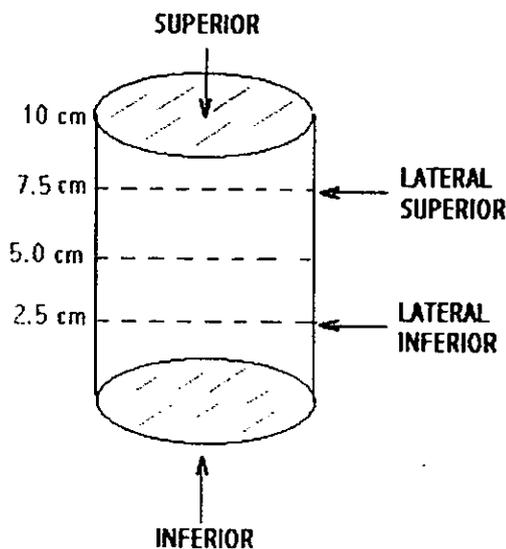


Figura 3.7.- Esquema representativo de las posiciones geométricas en que se realizó la detección en las muestras.

3.5.- Proceso de transformación de sales

Las sales de Na_2SO_4 contenidas en las muestras se transformaron en sales de BaSO_4 , para lo cual se preparó una solución de cloruro de bario al 10%, que se repartió en cuatro vasos de precipitado de 250 ml, en donde se colocaron cada una de las muestras dejándolas en inmersión durante un día. En ellas se llevó a cabo la reacción química de sustitución en donde el sulfato de sodio (Na_2SO_4), reaccionó con el cloruro de bario (BaCl_2) para formar una sal de bario de muy baja solubilidad, la reacción química que se lleva a cabo se explicará en el capítulo de resultados.

Se percolaron tres veces las muestras de piedra hasta que ya no se produjo precipitado alguno, se lavaron con agua corriente por espacio de una hora y se dejaron secar durante un día.

Secas las muestras se procedió a volver hacer la detección de la radiación emitida en los mismos cuatro puntos geométricos, por medio del detector de pozo acoplado al sistema electrónico de conteo.

3.6.- Proceso de eliminación del radiotrazador

Dado que las muestras seguían emitiendo radiación, se procedió a hacer una eliminación del radiotrazador con acetato de amonio[52]. Cabe mencionar que primero se intentó eliminarlo con agua, EDTA, ácido cítrico y ácido oxálico sin obtener buenos resultados[53].

Para la eliminación del radiotrazador se preparó una solución de acetato de amonio en la que se sumergió cada una de las muestras de roca, dejándose por espacio de 3 días, desechándose la solución residual. Las muestras se lavaron con agua corriente, se secaron y se volvió a hacer una detección de las radiaciones emitidas, notando de inmediato un conteo menor al inicial por lo que se continuó con este procedimiento, cada vez con una nueva solución de acetato de amonio por diferentes lapsos de tiempo, lavando, secando y detectando hasta que la actividad fue mínima, cosa que se dio después de 17 días. En este caso la reacción que se llevó a cabo fue la siguiente:



Finalmente, las muestras tratadas volvieron a caracterizarse con las técnicas analíticas mencionadas al principio de este capítulo. A continuación se presentan los resultados.

CAPITULO 4

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

4.1- Caracterización.

En el análisis de las muestras deterioradas del material pétreo por microscopía electrónica analítica de barrido se observaron estructuras con forma tubular, con diámetros de 10 a 40 micras, cuyas paredes presentan gran porosidad. Estas estructuras dirigidas en una misma dirección (figura 4.1), son las que favorecen el flujo del agua hacia la parte interna del material, para después permitir la migración de sales solubles al exterior cuando el agua se evapora. También se puede apreciar una gran cantidad de formas granulares con diámetros del orden de algunas unidades de micra. En algunas zonas se observaron superficies rugosas, debido principalmente, a la exfoliación que se presenta en forma de escamas en la superficie del material.

El análisis EDS realizado en la muestra mostró una gran cantidad de O, seguido de Si, Al, Na, K, Cl y en menor cantidad Fe, Mg y Ca, como se puede apreciar en el espectro EDS en la figura 4.2. Por otro lado, el análisis realizado en las sales mostró una gran cantidad de O, S, Na y en menos cantidad Mg, K, Fe, Si Al y Ca (figura 4.3). En ambos casos resalta la gran cantidad de sodio. En tanto que en las sales también llama la atención la gran cantidad de azufre. Resultados similares se obtuvieron para el resto de las muestras. En la tabla 4.1 se presentan de manera tabular los elementos encontrados con este tipo de análisis elemental, incluyendo sus concentraciones dadas en porcentaje en peso para cada una de ellos.

La difracción de rayos X realizados en las muestras mostró estructuras tales como la anortita y la albita, como se puede apreciar en el difractograma de la figura 4.4. En otras muestras se encontró la presencia de silicoaluminatos hidratados de potasio y fierro. En tanto que la difracción realizada únicamente en las sales que esflorecían en la superficie de los bajo relieves mostró la presencia de tenardita (sulfato de sodio), como se aprecia en la figura 4.5. En la tabla

4.2 se presentan las diferentes estructuras cristalinas identificadas en cada una de las muestras a través de la difracción de rayos X.

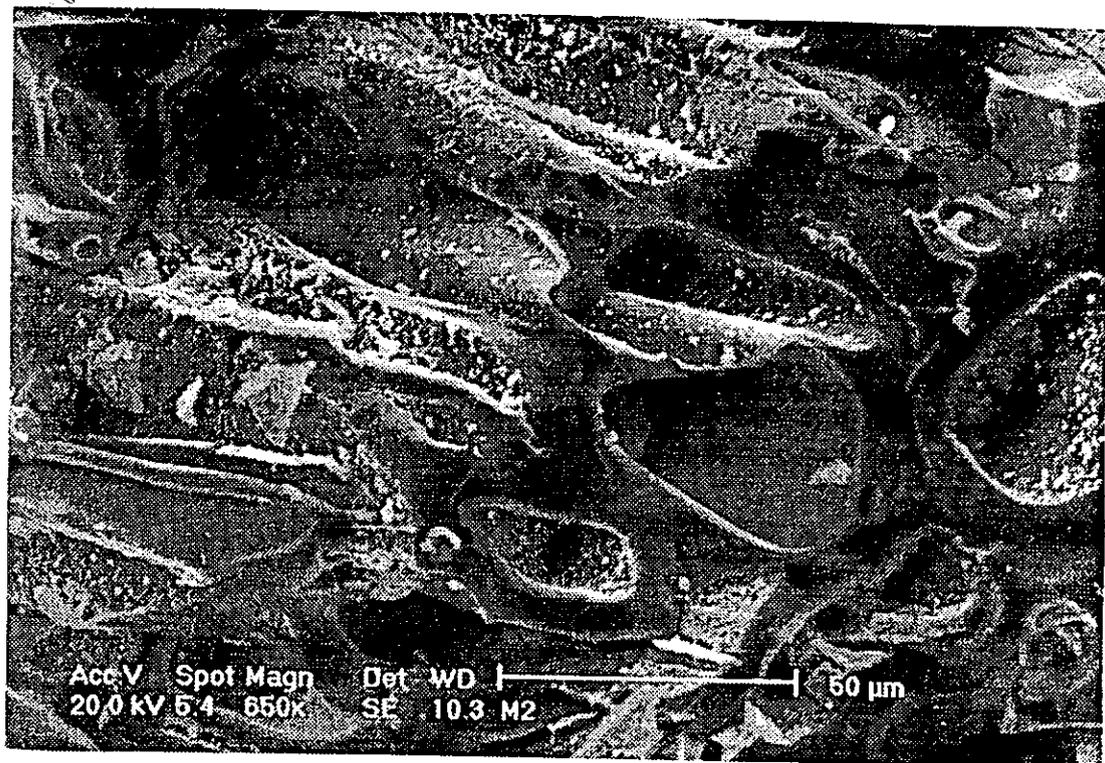


Figura 4.1.- Micrografía de la muestra M-1 tomada de los bajo relieves de la zona arqueológica de Tula, Hidalgo, antes de ser tratada con el radiotrazador. Se observan estructuras en forma de canales dirigidas en una misma dirección, proporcionando una estructura porosa al material, característica de las tobas volcánicas.

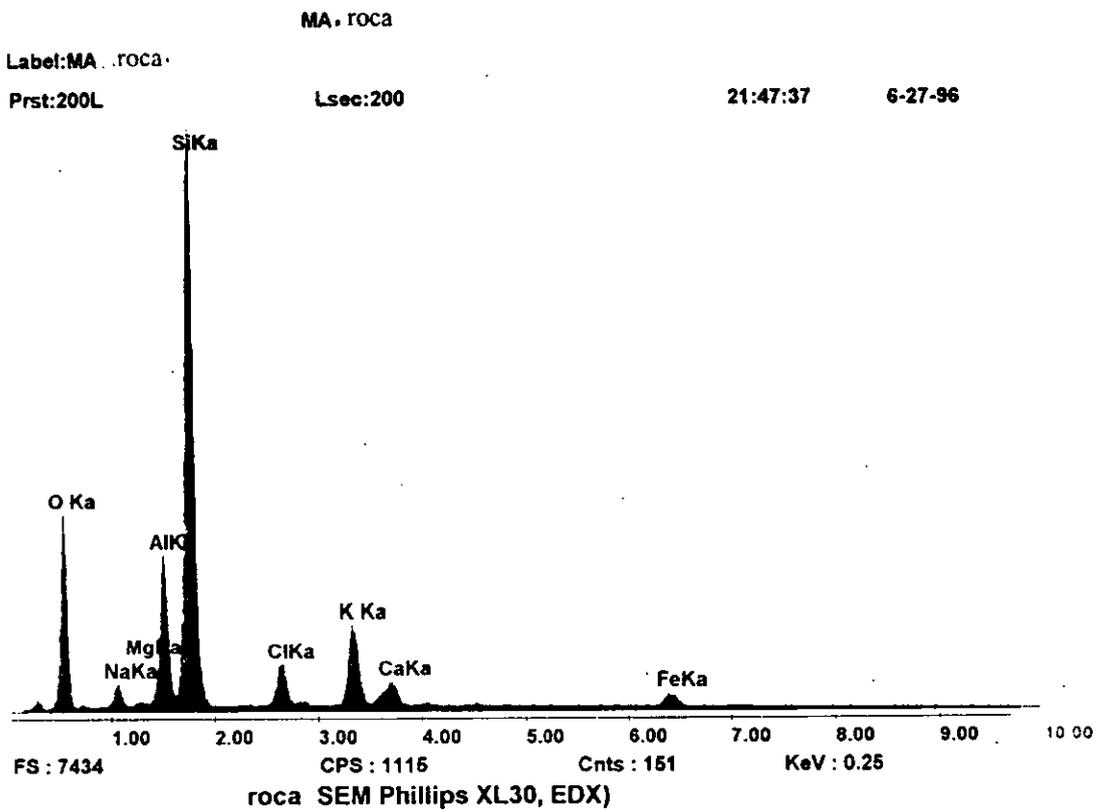


Figura 4.2.- Espectro EDS de la muestra M-1, antes del tratamiento con el radiotrazador.

SALES DE TULA

Label: SALES DE TULA

Prst: 200L

Laec: 200

15:35:35

1-16-97

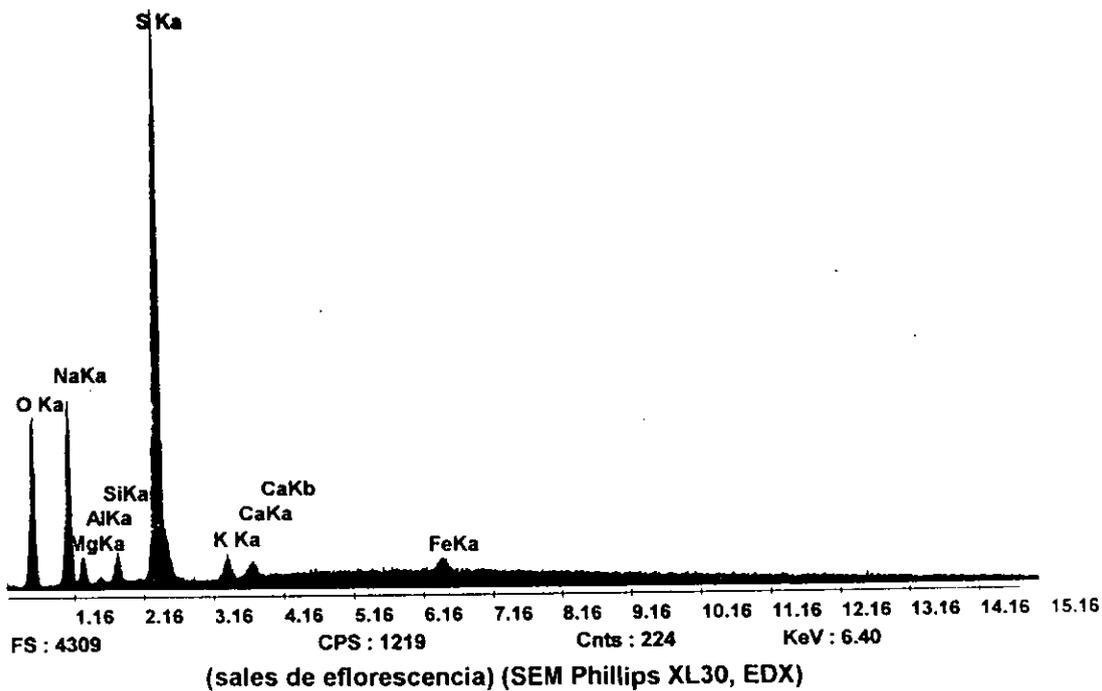


Figura 4.3.- Espectro EDS de las sales (eflorescencias) tomadas de la superficie de los bajo relieves.

Tabla 4.1- Composición elemental. Porcentaje en peso por análisis EDS de las muestras deterioradas.

<i>ELEMENTO</i>	<i>COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LAS MUESTRAS</i>				
	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>	<i>M4</i>	<i>SAIES</i>
<i>O</i>	<i>70.000</i>	<i>69.086</i>	<i>71.385</i>	<i>70.893</i>	<i>52.53</i>
<i>Si</i>	<i>9.094</i>	<i>20.085</i>	<i>15.525</i>	<i>12.402</i>	<i>1.000</i>
<i>S</i>	<i>3.847</i>	<i>-</i>	<i>0.640</i>	<i>2.001</i>	<i>23.256</i>
<i>Al</i>	<i>3.042</i>	<i>5.821</i>	<i>6.554</i>	<i>4.808</i>	<i>0.219</i>
<i>Na</i>	<i>1.722</i>	<i>3.066</i>	<i>0.907</i>	<i>2.379</i>	<i>18.032</i>
<i>Mg</i>	<i>1.075</i>	<i>-</i>	<i>1.514</i>	<i>1.699</i>	<i>1.679</i>
<i>K</i>	<i>0.697</i>	<i>1.507</i>	<i>0.626</i>	<i>0.748</i>	<i>1.101</i>
<i>Fe</i>	<i>0.424</i>	<i>0.430</i>	<i>1.198</i>	<i>0.379</i>	<i>1.682</i>
<i>Ca</i>	<i>1.734</i>	<i>-</i>	<i>0.826</i>	<i>0.605</i>	<i>0.778</i>
<i>C</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>0.825</i>	<i>-</i>	
<i>Cl</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>0.740</i>	
<i>Ba</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>3.347</i>	

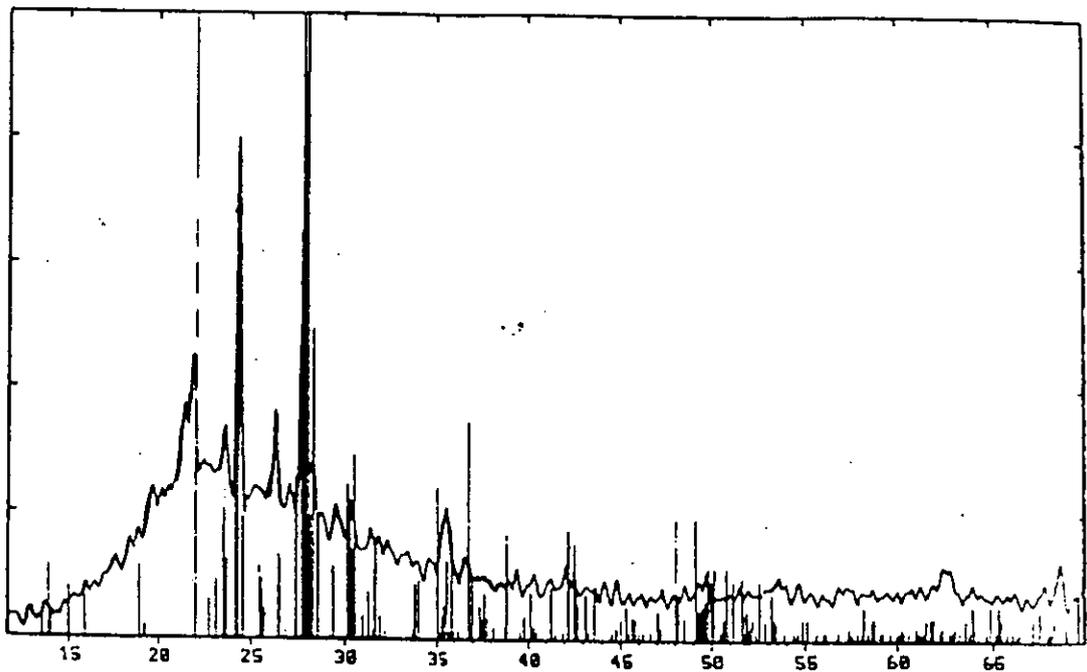


Figura 4.4.- Difractograma de la muestra M-1, antes del tratamiento. Se aprecia principalmente la presencia de Anortita y Albita.

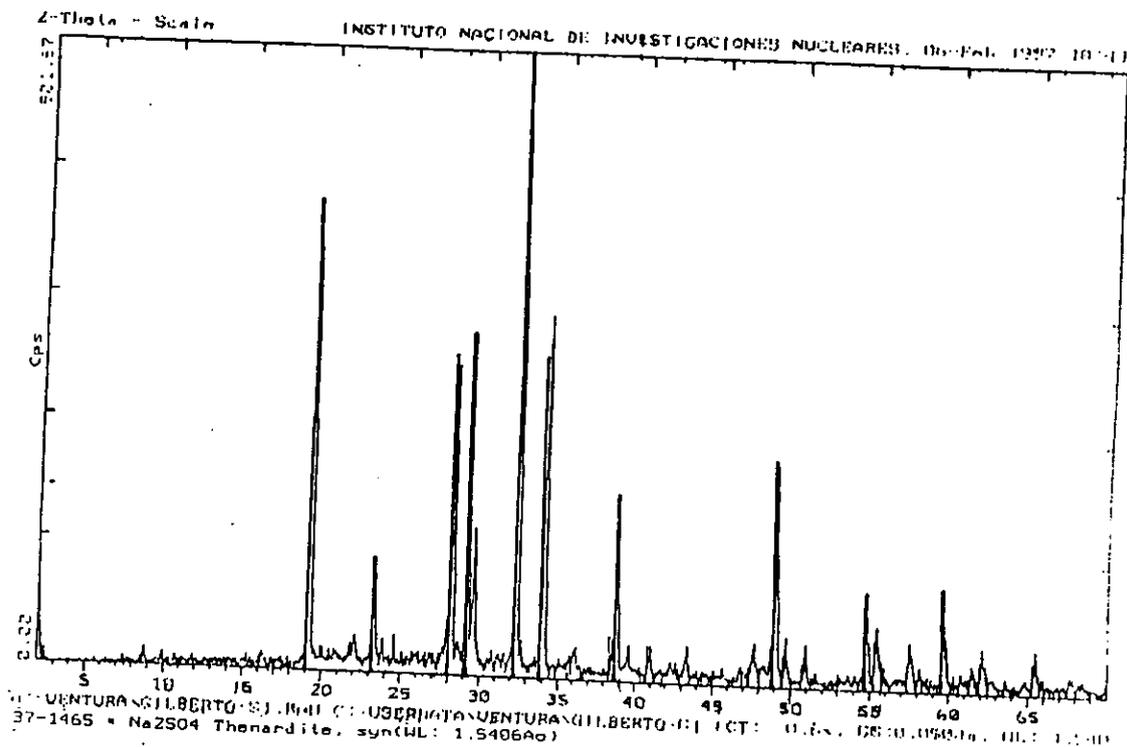


Figura 4.5.- Difractograma de las sales tomadas de los bajo relieves. Se observa la presencia de tenardita (sulfato de sodio anhidro).

Tabla 4.2- Fases cristalinas identificadas por difracción de rayos X.

MUESTRA	FASES CRISTALINAS
M1	Anortita
M2	Tenardita
M3	Anortita Albita
M4	Silico aluminato de potasio de fierro hidratado
SALES	Tenardita (Na_2SO_4)

De acuerdo con los resultados obtenidos por EDS y difracción de rayos X, la abundancia de sodio y azufre es marcadamente más alta comparada con la abundancia de otros elementos. De hecho, según la difracción, estos elementos están asociados formando sales de sulfato de sodio (tenardita) cuya característica sobresaliente es su alta solubilidad en agua; esta solubilidad se incrementa como una función no lineal de la temperatura. Por lo que el daño que sufren los materiales por el proceso de migración de sales, seguramente está asociado con este tipo de sal. De esta manera, para estudiar el proceso de migración de sales de sulfato de sodio, se decidió utilizar como radiotrazador al radioisótopo ^{22}Na , el cual tiene afinidad química con las sales de sulfato de sodio, además sus características de emisión de radiación gamma y su vida media son favorables para este estudio.

Las características del ^{22}Na utilizado como radiotrazador son las siguientes:

Se adquirió en julio de 1994 en forma de cloruro de sodio en solución acuosa. Su actividad específica es de 3.7 G Bq/mg (100 mCi). Con una pureza química de 10 $\mu\text{g/ml}$ de alguna impureza catiónica.

El ^{22}Na que tiene una vida media de 2.6 años, se caracteriza por decaer por captura electrónica (decaimiento β). Al realizarlo emite un positrón con una energía máxima de 1.83 MeV, que por aniquilación de éstas partículas se emite un rayo gamma con una energía máxima de 0.511 MeV.

También puede decaer por emisión de radiación gamma con una energía de 1.28 MeV. En este trabajo se detectó la radiación gamma de 0.511 MeV.

4.2.- Preparación de la solución marcada (^{22}Na)

Para llevar a cabo la absorción del radiotrazador en las muestras, primero se preparó una disolución de 1.0 ml de la solución de Na-22 aforado a 100 ml. De acuerdo con esto, la disolución presentó una actividad de

$$\frac{100\text{mCi}}{100\text{ml}} = 1.0 \frac{\text{mCi}}{\text{ml}}$$

A continuación se preparó una segunda disolución a partir de la primera. En este caso se tomó 2.0 ml de la primera y se aforó a 100 ml. La actividad de la segunda disolución fue de 2.22×10^7 dpm $\times 2$ ml (1/100 ml) = 4.44×10^7 dpm/ml.

Si consideramos una eficiencia en la detección del 0.1%, de acuerdo a nuestras condiciones geométricas y utilizando un detector de centelleo de pozo, NaI-Tl, el conteo por minuto en el detector será de

$$4.44 \times 10^7 \frac{\text{dpm}}{\text{ml}} \times \frac{0.1}{100} = 4.44 \times 10^4 \frac{\text{cpm}}{\text{ml}}$$

Dado que se requieren 10 ml para cubrir completamente una muestra, la razón de conteo será alta para el equipo de detección, 4.44×10^4 por lo que se procedió a realizar una tercera disolución, tomándose 2.0 ml de la segunda disolución y se aforó a 100 ml. Si consideramos que en nuestro trabajo experimental necesitamos detectar 10 mililitros aproximadamente, entonces tendremos una razón de conteo de 8.8×10^4 cpm/10ml, es decir 8800 cpm/ml, dato aproximado que en 10 minutos de detección garantiza una distribución estadística aceptable.

4.3.- Absorción del radiotrazador.

Para la absorción de la solución marcada con el radioisótopo ^{22}Na , las muestras procedentes de los bajo relieves fueron cortadas en forma cilíndrica de 10 cm de alto y 3 cm de ancho. A continuación se preparó una solución de sulfato de sodio al 10%, a la cual se agregaron 2 ml del producto marcado de la tercera disolución que contiene al ^{22}Na para dar lugar a una solución marcada con el acarreador.

De esta solución marcada se tomaron 10 ml que se colocaron sobre una charola de plástico con compartimientos cuadrados en donde en cada cuadro se colocó una muestra, llevándose a cabo la absorción de la solución del sulfato de sodio marcado. El tiempo de absorción y de secado fue de un día para cada caso.

De acuerdo al análisis realizado antes de la absorción del radiotrazador las muestras de piedra contenían sulfato de sodio, por lo que se adicionó sulfato de sodio marcado con ^{22}Na a las muestras con el fin de observar su migración a través del material.

Secas las muestras se procedió a la detección de la radiactividad emitida en los cuatro puntos geométricos de éstas (superior, inferior, lateral superior y lateral inferior, figura 4.6), con las siguientes condiciones de operación del sistema de detección:

Tiempo de conteo 10 minutos

Voltaje 1.9 = 800 - 900 volts.

Ventana 0.5

Umbral 2.2

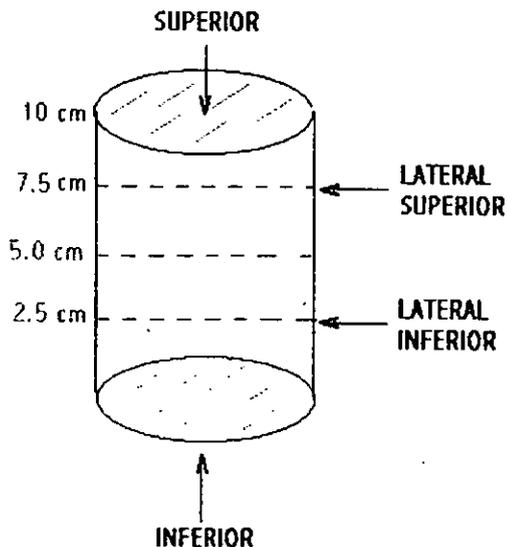


Figura 4.6.- Esquema representativo de las posiciones geométricas en que se realizó la detección en las muestras.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.3.

TABLA 4.3.- Razón de conteo de la radiación emitida en las muestras, después de la absorción del sulfato de sodio marcado con el radiotrazador ^{22}Na , en cuatro posiciones diferentes.

POSICIÓN	RAZON DE CONTEO (CP10M)			
	M1	M2	M3	M4
Abajo	7593	6695	6136	4449
Lateral Inferior	4780	6357	5802	4608
Lateral Superior	1727	3111	3639	2117
Arriba	1670	3335	3293	2090

En la figura 4.7 se presentan de manera gráfica los resultados de la tabla 4.3.

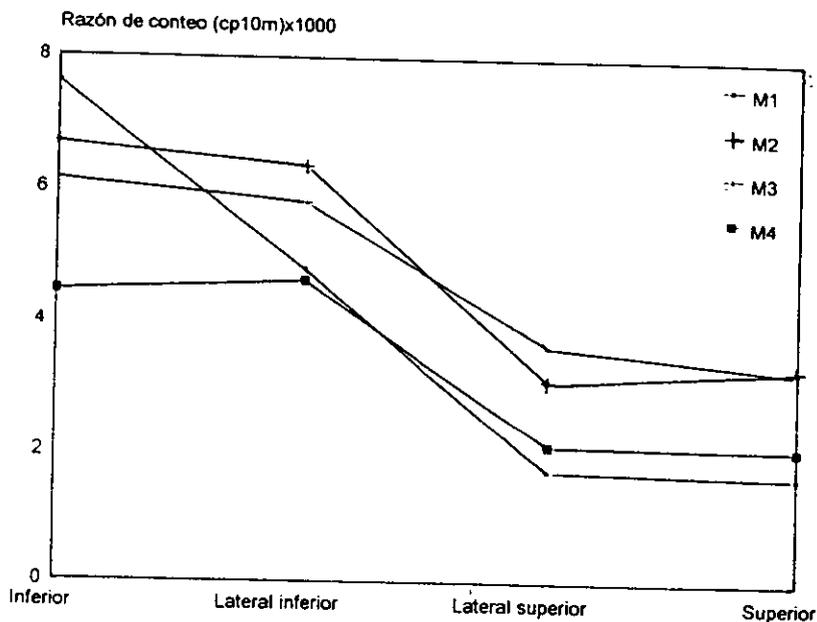


Figura 4.7.- Razón de conteo de las muestras después de la absorción del sulfato de sodio marcado con el radiotrazador ^{22}Na .

Como se puede ver en esta gráfica, en la parte inferior y lateral inferior la razón de conteo es muy similar, en tanto que algo semejante se observa para la parte superior y lateral superior. También se puede observar que para la razón de conteo existe una relación de aproximadamente 2:1 entre la parte inferior y la parte superior de las muestras.

Tomando en cuenta que la actividad de una muestra radiactiva es proporcional al número de núcleos presentes, se deduce que la mayor concentración del radiotrazador se da en la parte inferior. Esto es normal dado que la absorción del radiotrazador sucedió de la parte inferior a la

parte superior; aunque la relación de conteo en ambas partes puede variar dependiendo de la naturaleza de las muestras.

El hecho de que la acumulación del radiotrazador se halla distribuido en toda la muestra y que en la parte superior exista una alta concentración de éste, tomando en cuenta la distancia que tuvo que recorrer a través del material (10 cm), nos da una idea de la porosidad de las muestras, lo cual coincide con lo que se observó a través de la microscopía electrónica (figura 4.1).

Este resultado es importante ya que se desea sustituir las sales solubles por sales insolubles a través de la adsorción y reacción química. Tomando en cuenta este comportamiento, pueden existir partes preferenciales de intercambio, aunque debido a la porosidad de las muestras, la adsorción es el proceso más indicado para este caso.

4.4.- Transformación del sulfato de sodio a sulfato de bario.

Dado que el sulfato de sodio presente en los bajo relieves es un factor determinante en el deterioro de los materiales debido a su solubilidad y cristalización, se buscó la manera de transformar este tipo de sales en otras de poca o nula solubilidad. De acuerdo con la literatura, las sales de sulfato de bario son de muy baja solubilidad y a su vez el sulfato de sodio reacciona muy fácilmente con el cloruro de bario, dando como resultado una reacción de sustitución, como se describe a continuación:



Una vez terminado el conteo, las muestras se percolaron varias veces hasta que ya no se produjo precipitado alguno. A continuación se lavaron con agua corriente por espacio de una hora y se dejaron secar durante un día. Secas las muestras, se procedió a realizar de nuevo la detección de la razón de conteo.

En la tabla 4.4 se presentan los resultados de este conteo.

TABLA 4.4.- Razón de conteo de la radiación emitida en las muestras, después de la transformación del sulfato de sodio marcado en sulfato de bario, en las cuatro posiciones geométricas.

POSICION	RAZON DE CONTEO (CP10M)			
	M1	M2	M3	M4
Arriba	1996	3689	3273	2184
Abajo	5161	4424	3923	3079
Lateral Inferior	4774	4060	3630	2931
Lateral Superior	2777	3580	3835	2117

En la figura 4.8 se presentan de manera gráfica los resultados de esta tabla.

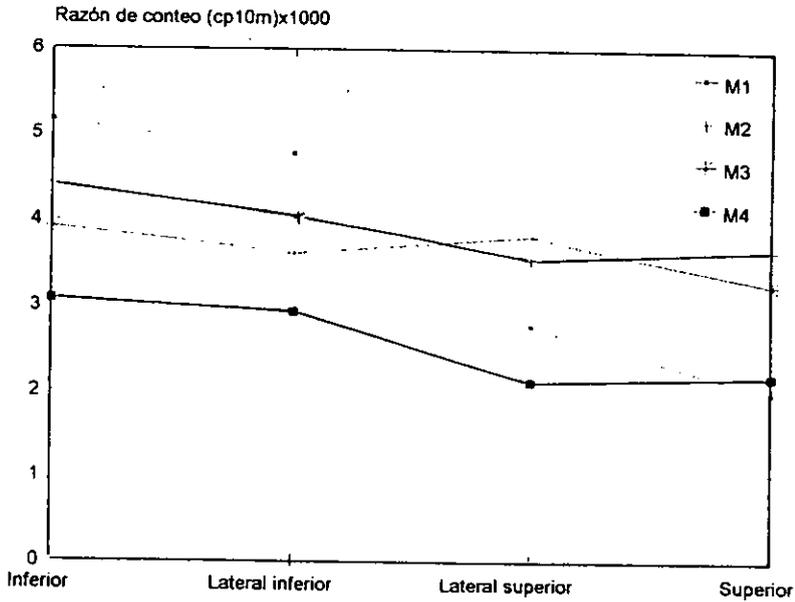
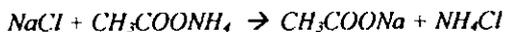


Figura 4.8.- Razón de conteo de las muestras después de la percolación.

Como se puede observar en la tabla 4.4 y figura 4.8, la actividad de las muestras se sigue conservando alta, es decir, los lavados con agua simple no fueron suficientes para eliminar los iones de sodio marcado. Por lo que se utilizó un método alternativo, con base en una solución de acetato de amonio.

4.5.- Eliminación de sodio.

Después de la transformación del sulfato de sodio marcado a sulfato de bario, se llevó a cabo la eliminación del ion sodio adsorbido. Para ello se utilizó una solución de acetato de amonio 1N y con tiempos de retención total de 17 días. En este caso, la reacción llevada a cabo es:



donde los productos de la reacción son solubles en agua, lo cual facilita su eliminación.

Cada tres días se realizaba un lavado con agua limpia en todas las muestras y se efectuaba el conteo de la actividad de la muestra, hasta que ésta se consideró baja para manipularse. En la tabla 4.5 se presenta la razón de conteo después de cada fase de lavado.

Tabla 4.5.- Razón de conteo de las muestras, después de cada fase de lavado.

POSICION DE LAS MUESTRAS	RAZON DE CONTEO (CP10 M)					
	3 días	5 días	8 días	11 días	14 días	17 días
<i>M-1 superior</i>	2062	1881	1263	985	791	422
<i>M-1 inferior</i>	2870	2253	1533	1046	858	534
<i>M-1 lateral inferior</i>	3246	2318	1619	1208	1043	633
<i>M-1 lateral superior</i>	2153	2061	1223	814	672	581
Promedio	2583	2128	1410	1013	841	543
<i>M-2 superior</i>	2801	2253	1730	1361	924	891
<i>M-2 inferior</i>	2376	2107	1502	1395	1255	940
<i>M2 lateral inferior</i>	2221	1945	1541	1420	1020	657
<i>M-2 lateral superior</i>	2335	1908	1460	1320	1163	1051
Promedio	2433	2053	1558	1374	1090	884
<i>M-3 superior</i>	3102	2484	1957	1678	1603	1362
<i>M-3 inferior</i>	3559	2921	2160	1918	1572	1522
<i>M-3 lateral inferior</i>	3235	2468	1976	1737	1621	1408
<i>M-3 lateral superior</i>	3104	2530	1899	1783	1638	1378
Promedio	3250	2601	1998	1779	1608	1417
<i>M-4 superior</i>	1956	1917	1716	1441	1200	876
<i>M-4 inferior</i>	1872	1641	1377	1104	1028	869
<i>M-4 lateral inferior</i>	1742	1755	1450	1364	1134	948
<i>M-4 lateral superior</i>	1888	1893	1538	1439	1235	821
Promedio	1864	1801	1520	1337	1149	878

En la figura 4.9 se presenta de manera gráfica, en escala lineal, la razón de conteo promedio de cada una de las muestras tratada con la solución de acetato de amonio, en función del tiempo de retención en días. Como se puede observar en esta gráfica, la razón de conteo disminuye conforme transcurre el tiempo de retención. Este comportamiento aparenta ser de tipo

exponencial, por lo que para verificar que se trata de una eliminación exponencial, se procedió a trazar una gráfica de los datos en escala semilogarítmica. En la figura 4.10 se muestra dicha gráfica, en la que se observa, efectivamente un comportamiento exponencial.

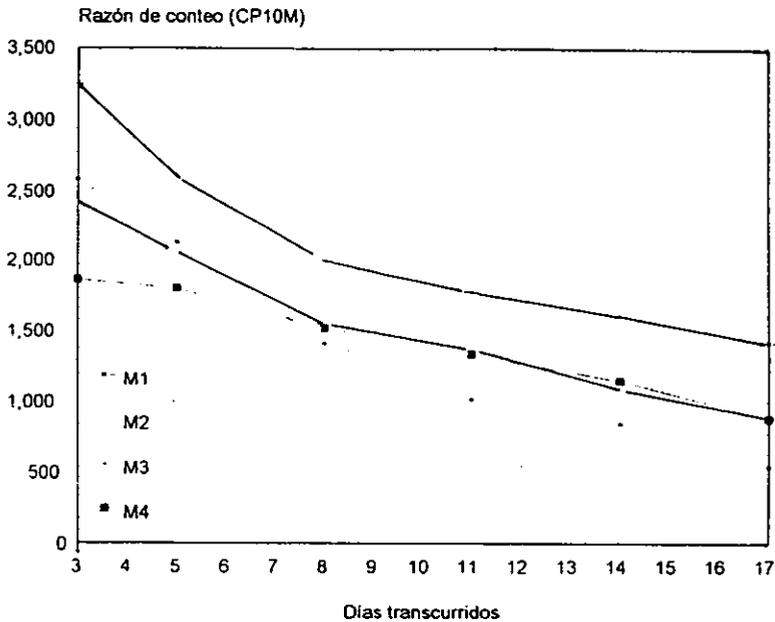


Figura 4.9.- Gráfica en escala lineal de la razón de conteo, en función de los días transcurridos, después de cada fase de lavado de las muestras con la solución de acetato de amonio.

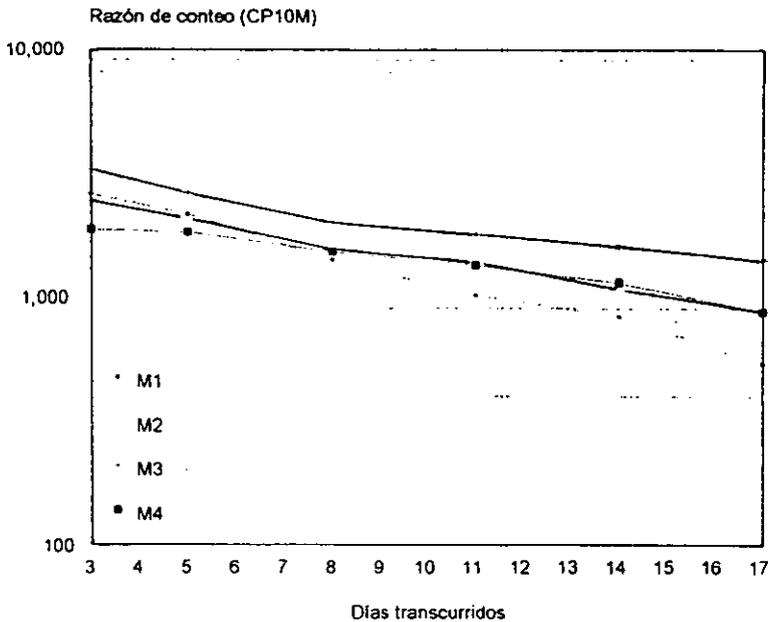


Figura 4.10.- Gráfica en escala semilogarítmica de la razón de conteo, en función de los días transcurridos, después de cada fase de lavado de las muestras con la solución de acetato de amonio

Mediante un análisis por mínimos cuadrados se realizó un ajuste de los datos para encontrar alguna forma matemática que relacionara la razón de conteo y los días de retención o de lavado de las muestras. Se encontró que los puntos se ajustan a una ecuación exponencial, lo cual explica el hecho de que al realizar la gráfica en escala semilogarítmica, los puntos se ajusten a una recta.

De esta manera, la ecuación que se ajusta a los resultados obtenidos es de la forma

$$A = ce^{-ad} \tag{4.1}$$

donde A representa la razón de conteo (CP10M) y d los días de lavado; a y c son constantes características para cada muestra. En la tabla 4.6 se dan los valores de estas constantes y el coeficiente de correlación, r , correspondiente.

Tabla 4.6.- Constantes asociadas a las ecuaciones correspondiente a los ajustes.

MUESTRAS	CONSTANTES		COEFICIENTE DE CORRELACION
	a	c	r
M1	0.1090	3550	-0.9957
M2	0.0706	2921	-0.9962
M3	0.0564	3490	-0.9712
M4	0.0527	2296	-0.9865

Con el fin de explicar el mecanismo de migración de los iones solubles a través de material pétreo, se planteó un modelo matemático basado en las siguientes consideraciones:

a) Sea dc una masa infinitesimal, en g, de iones adsorbidos en un tiempo diferencial de t , dt en s, sobre una diferencial de volumen cilíndrico de altura dh , radio dr y sección transversal ds (figura 4.11).

b) La velocidad de adsorción de los iones en el material pétreo, $\frac{dc}{dt}$, es igual a la velocidad de pérdida de los mismos iones de la solución y es una función de la concentración, C , de la solución (g/cm^3), de la velocidad, $v = \frac{dh}{dt}$, con que asciende la solución a través del material y por tanto del gasto dQ (cm^3/s) que atraviesa la sección transversal ds (cm^2).

De esta manera se tiene que la velocidad de adsorción [29] estará dada como

$$\frac{dc}{dt} = Cdvds \quad (4.2)$$

y dado que el gasto Q esta dado por

$$Q = -dv/ds \quad (4.3)$$

donde el signo negativo indica que la concentración disminuye en el tiempo. Por lo que se tiene que

$$\frac{dc}{dt} = -CQ \quad (4.4)$$

Integrando esta ecuación y tomando en cuenta que para $t=0$, $C=C_0$, se tiene que

$$\ln C = -Qt + \ln C_0 \quad (4.5)$$

Simplificando esta ecuación se tiene

$$C = C_0 e^{-Qt} \quad (4.6)$$

La cual indica que la concentración de iones adsorbidos sigue una ley de tipo exponencial. Por lo que de esta manera se explica el comportamiento observado en la detección de la adsorción experimental de los iones de ^{22}Na adsorbido en el interior de las muestras (ec. 4.1).

Cabe mencionar que este razonamiento supone que la muestra es homogénea, lo cual no ocurre en la realidad, sin embargo en este estudio las muestras fueron de un volumen relativamente pequeño por lo que el razonamiento se puede considerar valido.

Este razonamiento también nos puede dar información relacionada con la porosidad del material a través del valor de Q , que es característico para cada material.

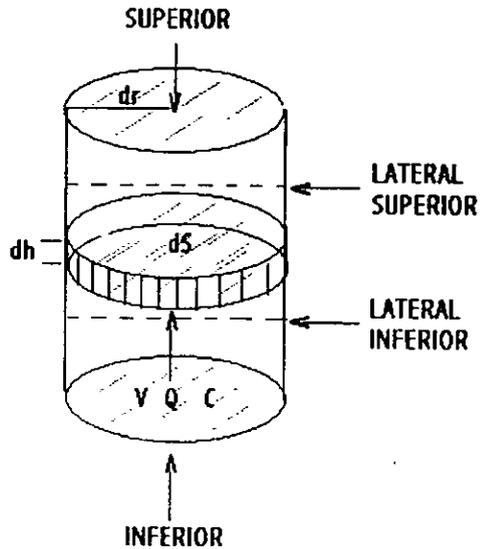


Figura 4.11.- Esquema representativo para explicar el mecanismo de absorción de iones solubles a través de un material poroso.

Una vez finalizado el tratamiento de absorción, transformación de sales y eliminación del radiotrazador, se volvió a caracterizar cada una de las muestras, mediante la técnica de microscopía electrónica analítica de barrido.

En la figura 4.12 se presenta la micrografía de muestra M-1 después del tratamiento. En esta se puede apreciar la obturación de los poros y grietas de la muestra. Una amplificación mayor permite observar la disposición de los cristales de sulfato de bario llenando los poros y grietas del material. En ésta también se pueden apreciar las diferentes formas de los cristales debido a que el sulfato de bario es polimorfo (figura 4.13).

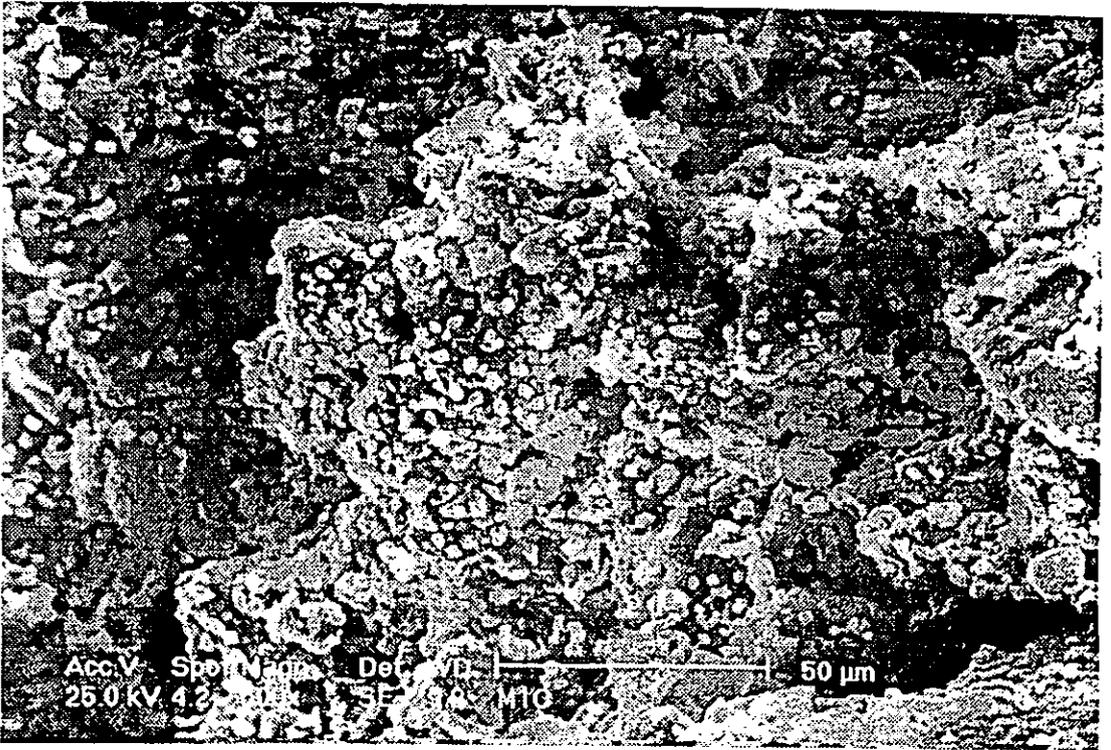


Figura 4.12.- Micrografía de la muestra M-1 después del tratamiento con cloruro de bario. En ésta se puede apreciar la obturación de los poros y grietas de la muestra con el sulfato de bario.

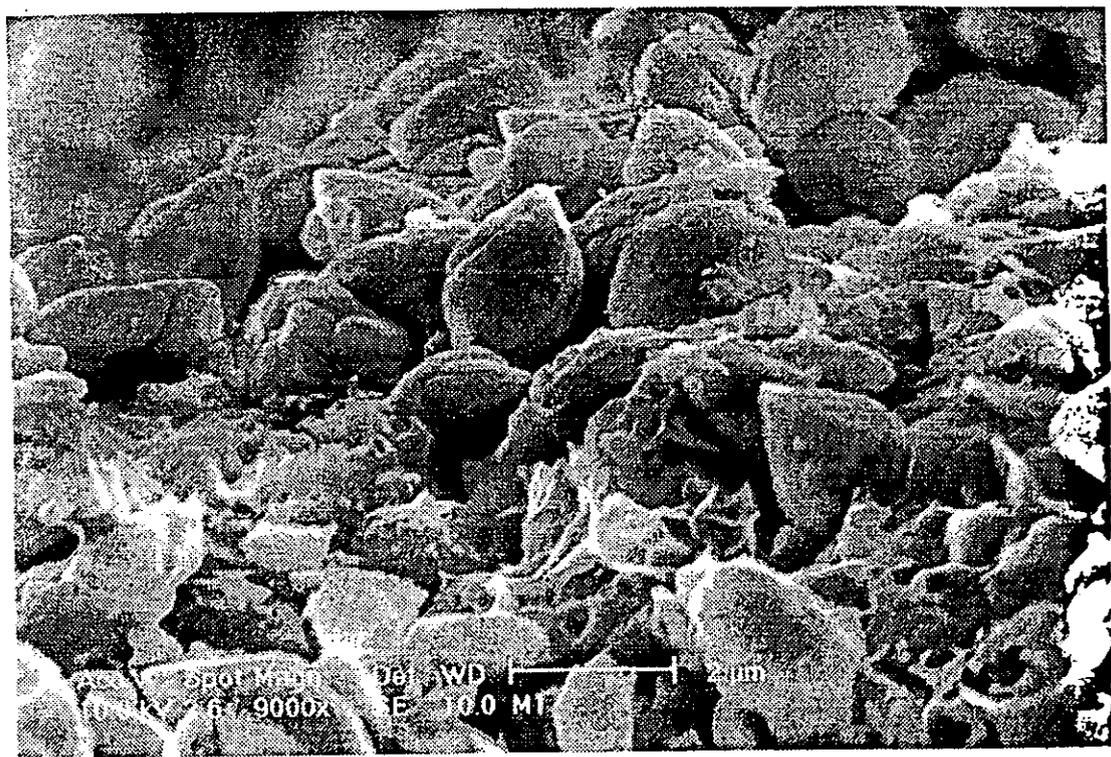


Figura 4.13.- Micrografía con una mayor magnificación de la muestra M-1, después del tratamiento. Se observa la disposición de los cristales de sulfato de bario llenando los poros y grietas del material. También se aprecia las diferentes formas de los cristales debido que el sulfato de bario es polimorfo.

En la figura 4.14 se presenta el espectro EDS de la misma muestra en donde se aprecia una gran cantidad de O, Si y Al y en menos cantidad Ba, Na, S, Mg, Cl, K, Ca y Fe. Comparando el espectro de las muestras antes del tratamiento y después de éste, resalta la presencia del Ba, lo cual era de esperarse ya que fue incorporado para sustituir las sales de sodio.

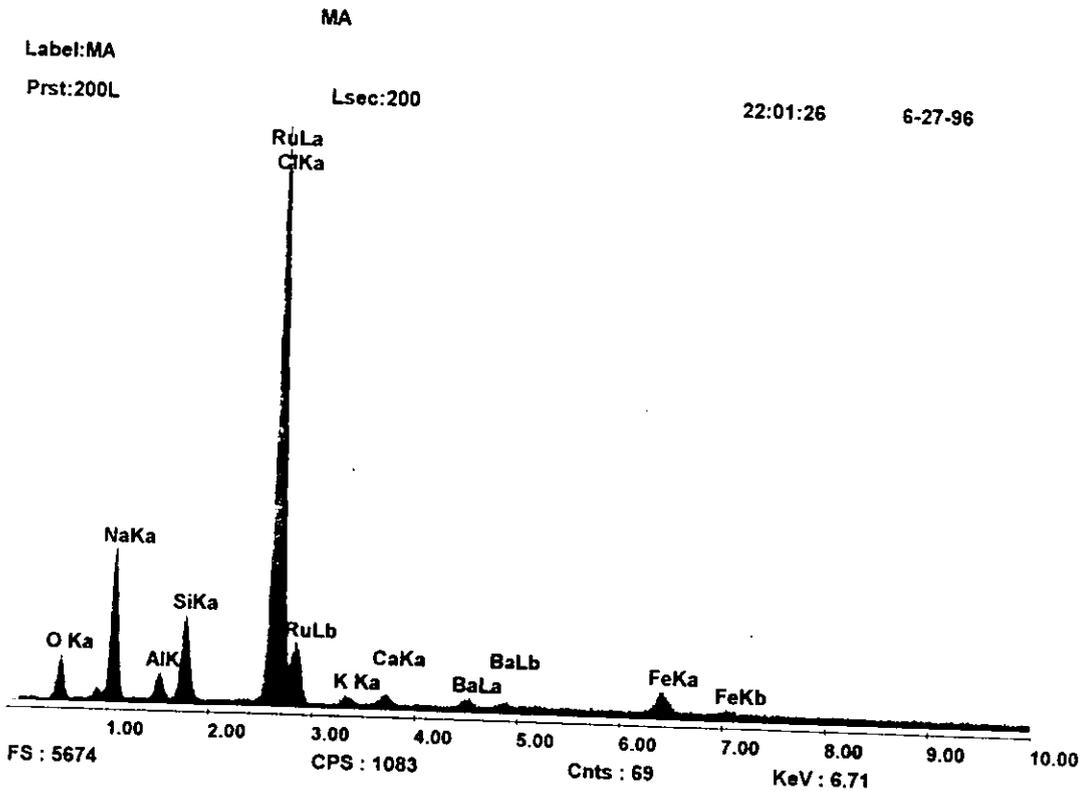


Figura 4.14.- Espectro EDS de la muestra después del tratamiento. Se puede apreciar la presencia del Ba.

4.6.- Análisis de resultados y conclusiones.

La humedad proveniente del agua de lluvia y del subsuelo en muros antiguos destruye los materiales de piedra con bajorrelieves incluyendo recubrimientos de cal y capas de pintura.

Las sales, principalmente los sulfatos de sodio presentes en esta humedad, son uno de los principales factores en la destrucción de estos materiales como lo demostró el análisis de microscopía electrónica analítica de barrido y la difracción de rayos X, los cuales muestran una mayoría de iones, oxígeno, azufre y sodio, que corresponden al sulfato de sodio anhidro o tenardita que se caracteriza por su alta solubilidad.

En consecuencia la elección del sulfato de sodio marcado con ^{22}Na es un buen indicador del comportamiento de los iones de sodio en solución cuando migran desde el suelo por el interior de la piedra hasta brotar en la superficie, donde precipitan al evaporarse la humedad que los mantiene en solución formándose eflorescencias sobre la superficie del material.

El proceso de migración de sales realizada en el laboratorio con el radiotrazador ^{22}Na demuestran que los iones de sodio se distribuyen de manera diferencial a través del material como se puede apreciar en la figura 4.7, en donde, hay una mayor acumulación en la parte inferior de las muestras, respecto de la superior. También se observó que la adsorción de los iones solubles sigue un comportamiento de tipo exponencial. Así mismo, de acuerdo con la gran cantidad de solución marcada con el radiotrazador que emigró al otro extremo de las muestras da una idea clara de la porosidad de éstas. Incluso se puede deducir que el método de radiotrazadores puede ayudar a una clasificación de acuerdo a su grado de porosidad, según el modelo matemático planteado.

Después de la transformación del sulfato de sodio a sulfato de bario se observó una gran adsorción del ion sodio en el interior de éstas, al no ser arrastrado por agua simple, siendo necesario usar una solución de acetato de amonio para lograr este objetivo. En este caso, se encontró un comportamiento exponencial de eliminación del sodio.

Después del proceso de eliminación del radiotrazador y secado de las muestras, se logró:

- a) Evitar la movilidad de los iones sulfato y sodio al formar el precipitado de sulfato de bario cuya estructura cristalina es polimorfa.

b) Evitar el crecimiento y contracción por hidratación y deshidratación de los iones sulfato, al combinarse con el bario.

c) Al reducir la porosidad de las muestras, cuando se deposita la sal insoluble de sulfato de bario en los pequeños espacios de su interior, se evita la formación y acumulación de eflorescencias en el exterior, con lo cual disminuye el deterioro causado por la exfoliación y estallamiento.

De hecho, el análisis por microscopía electrónica mostró la oclusión de poros y grietas en el material, siendo ésto lo que condujo a una mayor consistencia. Por lo tanto, se puede decir que el mecanismo de migración de los iones de sodio en estas condiciones requiere una saturación previa de sulfato de sodio y un intercambio iónico posterior. El comportamiento del ion sulfato como componente de algún otro ion, sería materia de otro estudio usando otro marcador, probablemente un radioisótopo de S.

Las micrografías tomadas con el microscopio electrónico de la superficie de las muestras antes y después del tratamiento, muestran que efectivamente se reduce la porosidad y aumenta la superficie específica del material, lo que conduce a una disminución del flujo de humedad a través del material y la consecuente disminución de la migración de sales. El estado de conservación de las muestras sujetas a este tratamiento resulta satisfactorio, aún cuando el procedimiento de desmontar los bajo relieves y hundirlos en la solución de cloruro de bario resulta laborioso, por lo que habría que idear un procedimiento de aplicación adecuado. Sin embargo, este método como sistema de oclusión de la porosidad de rocas en estas condiciones, parece ideal.

Es necesario mencionar el hecho de que la conservación de monumentos prehispánicos es una tarea gigantesca que solo puede prosperar si está basada en resultados obtenidos al aplicar pruebas modernas de laboratorio.

Finalmente se puede decir que el método de radiotrazadores es adecuado para el estudio de migración de sales a través de materiales porosos, tales como los de construcción prehispánica. Los resultados que se obtienen con este método, permiten conocer algunas de las características

de estos materiales, tales como el grado de porosidad, además también permiten sugerir tratamientos adecuados de conservación.

APENDICE

DETECTORES DE RADIACION.

Con el descubrimiento de la radiactividad por Becquerel, un problema que se presentó fue el de detectar las radiaciones.

El primer método de detección lo constituyó el empleo de placas fotográficas; ya que éstas resultan impresionadas por las radiaciones ; de hecho éste fue el origen del descubrimiento de la radiactividad. En la actualidad se emplean placas fotográficas especiales muy gruesas que tienen poca gelatina y una mayor cantidad de halogenuro de plata.

Rutherford descubrió un segundo método de detección, teniendo en cuenta que las partículas alfa al incidir en una pantalla cubierta de sulfuro de zinc (ZnS), producen un destello o centelleo luminoso. Este método permitió a Rutherford, incluso contar el número de partículas alfa emitidas por una sustancia radiactiva, observando los centelleos mediante un microscopio. El fundamento de este método de detección es en el que están basados los actualmente conocidos contadores de centelleo que explicaremos más adelante.

A-1.- Cámara de niebla.

Otro método de detección lo constituyó la cámara de Wilson (1912). Esta cámara consiste en un cilindro con un pistón (Figura A.1) en el que se encierra un gas saturado con vapor de agua a una temperatura T , una presión P y un volumen V , si entonces se produce una expansión adiabática, bajando súbitamente el pistón, de modo que el sistema toma características $T' < T$, $P' < P$ y $V' > V$, el vapor se sobresatura y parte de él tiende a condensarse bajo la forma de gotas, estas se forman en especial alrededor de partículas de polvo, impurezas o iones, que actúan como núcleos de condensación.

En estas condiciones es fácil comprender que si la cámara se limpia previamente, es posible su uso como detector de radiaciones. En tal caso su operación se realiza en la siguiente forma.

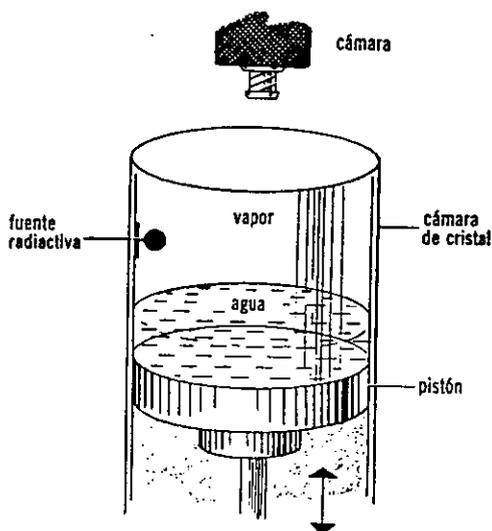


Figura A.1.- Esquema representativo de la Cámara de Niebla.

Si en el interior de la cámara se tiene una sustancia radiactiva, las radiaciones emitidas al atravesar el gas, ionizan los átomos de éste, entonces los iones así formados son los que actúan como núcleos de condensación y las gotas formadas alrededor de ellos señalan las trayectorias de las radiaciones. Las observaciones de tales trayectorias puede hacerse por la cubierta del cilindro de vidrio.

Otro método de detección que corresponde en cierta forma al de Wilson, es el de la cámara de burbuja. Si a través de un líquido sobrecalentado, es decir, casi a punto de hervir, pasan radiaciones los iones producidos originan la formación de burbujas que visualizan las trayectorias de las radiaciones. Esta cámara resulta más eficiente para detectar radiaciones de alta energía por tener un detector más denso.

A-2.- Detectores de gas

Una familia muy importante de detectores es la de aquellos que basan su funcionamiento en la separación de los iones producidos al pasar radiaciones a través de un gas, mediante la acción de un campo eléctrico proporcionado por una diferencia de potencial entre dos electrodos. La forma de estos contadores es variable pero la más común es la siguiente : un cilindro, que puede ser de metal o vidrio cubierto interiormente con grafito, lleva coincidiendo en su eje, un alambre del que se aísla. En el interior del cilindro se encierra un gas a baja presión, el cual puede ser aire o más comúnmente algún gas inerte (He, Ar, Xe, etc.). Para facilitar la entrada de la radiación al cilindro. Una de las bases de éste es una ventana muy delgada de vidrio o generalmente de mica. (figura A. 2)

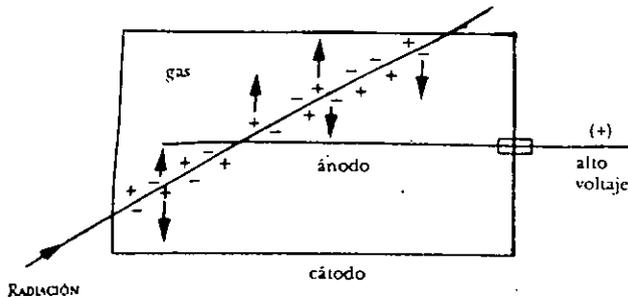


Figura A.2.- Funcionamiento de un detector gaseoso. Los iones y electrones producidos en el gas por la radiación son colectados en el ánodo y el cátodo.

El funcionamiento de este tipo de detector se realiza en las siguientes condiciones : una diferencia de potencial es aplicada entre el alambre (ánodo) que se hace positivo y el cilindro (cátodo). Al pasar las radiaciones a través del gas contenido en el cilindro se producen iones

positivos y negativos, los cuales se separan bajo la acción de un campo eléctrico dirigiéndose al electrodo de signo contrario, es decir los iones positivos al cilindro y los negativos al alambre. En este caso, los iones negativos son principalmente electrones y en consecuencia sus velocidades son del orden de 10,000 veces la de los iones positivos, dirigiéndose rápidamente al alambre produciéndose una caída de potencial que se llama "pulso" y que es registrable con un voltímetro o un osciloscopio conectado al sistema.

El tamaño del pulso o valor de caída de potencial depende de dos factores principales : (a) el voltaje o diferencia de potencial aplicado, y (b) la energía de radiación.

Para conocer las relaciones entre estas magnitudes, consideramos la gráfica mostrada en la figura A.3 que lleva voltaje (V) en las abscisas y tamaño de los pulsos (T_p) en ordenadas.

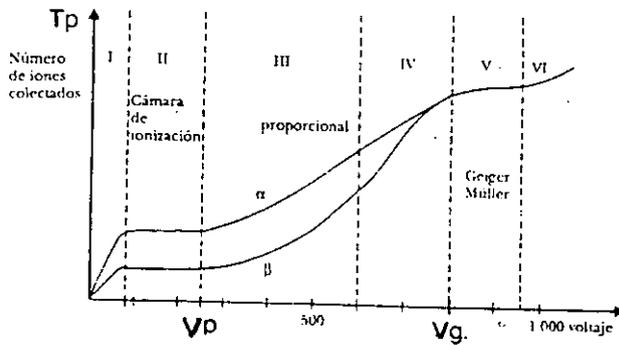


Figura A.3.- Regiones de operación de un detector gaseoso.

En ausencia del campo eléctrico ($V=0$), los iones producidos se recombinan de inmediato y por lo tanto no hay pulso ($T_p=0$).

Para los valores pequeños de (V), crecientes a partir de cero, T_p toma también valores pequeños que crecen a partir de cero, además $T_p(E_1) > T_p(E_0)$.

Esto es obviamente comprensible, pues la radiación de mayor energía produce mayor número de pares de iones que las de menor energía, además el campo eléctrico creciente hace disminuir el número de recombinaciones y en consecuencia T_p crece.

A partir de cierto valor, relativamente bajo de V , T_p permanece constante, aunque crezca el valor de V , esto es debido a que el campo eléctrico separa todos los iones secundarios. Si el contador opera en estas condiciones, recibe el nombre de "cámara de ionización". El tamaño de pulso (T_p) es entonces :

$$T_p = \frac{Q}{C} = \frac{ne}{C} \quad (A.1)$$

donde Q es la carga total de los n iones negativos primarios, e es la carga electrónica, mientras que C es la capacidad del sistema, siendo ésta última una constante.

T_p vuelve a crecer a medida que crece V , al alcanzar éste un cierto valor V_p llamado "voltaje umbral de la región de proporcionalidad" que sigue a la cámara de ionización, se caracteriza porque en ella :

$$T_p = \frac{Ane}{C} \quad (A.2)$$

siendo $A > 1$ el llamado factor de amplificación.

La explicación de esto reside en que para valores de $V > V_p$, el campo eléctrico proporciona a los electrones la suficiente energía para que se produzca ionización secundaria. En efecto, la intensidad del campo eléctrico a la distancia r del alambre está dado por :

$$E(r) = \frac{V}{r} \ln\left(\frac{r_c}{r_0}\right) \quad A.3$$

siendo r_c el radio del cilindro y r_0 el radio del alambre, entonces un electrón a medida que se acerca al alambre va adquiriendo mayor energía y cuando tiene suficiente para ionizar un átomo y así lo hace, el electrón secundario es a su vez capaz de producir nuevas ionizaciones y así

sucesivamente, es decir se presenta una multiplicación o avalancha de electrones, cuyo resultado es un T_p mayor.

Para tener en cuenta que factores determinan el valor de A debemos distinguir dentro de la región en estudio dos regiones: la propiamente proporcional y la semiproportional o de proporcionalidad limitada.

En la región proporcional propiamente dicha, A tiene un valor fijo para un voltaje dado y crece con éste. Evidentemente en la región de cámara de ionización, $A = 1$.

En la región de proporcionalidad limitada A depende de V y de n , creciendo al crecer aquel y decreciendo al crecer éste.

Como resultado, los valores de $T_p(E_i)$ y $T_p(E_0)$ tienden a igualarse, cosa que sucede a un voltaje V_g .

V_g es el llamado "voltaje umbral de la región Geiger" y para valores de $V > V_g$ se tiene la conocida como "región Geiger - Muller", cuya característica es que proporciona pulsos cuyo tamaño es independiente de la energía de la radiación. En esta región T_p sigue creciendo al crecer V .

Después de la región Geiger, se tiene una región en la que para una pequeña radiación de V , T_p crece en forma desproporcionada teniéndose una descarga, y continúa y ésta es la que da el nombre a la región. En tal región no debe hacerse trabajar el detector para evitar que se dañe.

Siguiendo el orden cronológico, en 1928, Geiger y Muller descubrieron el uso del contador en la región que lleva su nombre y en el cual T_p es suficiente para que mediante previa y relativamente pequeña amplificación, haga funcionar un circuito electrónico que lleve el número de pulso (np).

Se debe tomar en cuenta que en esta región no es posible la determinación de energías.

El uso del "contador proporcional" es posterior al de Geiger; tiene la ventaja de que puede discriminar entre diferentes radiaciones de acuerdo a su energía, aunque también tiene la desventaja de que los pulsos que proporciona requieren una mayor amplificación y su buen funcionamiento depende de la estabilidad del voltaje.

Un contador Geiger puede detectar y contar radiaciones ionizantes, sin embargo, tiene una eficiencia muy pequeña para contar rayos gamma.

A-3.- Detectores de centelleo.

Los detectores de centelleo, al igual que las pantallas de centelleo, detectan las radiaciones aprovechando el hecho de que al incidir estas radiaciones en ciertas sustancias llamadas "fósforos" producen un centelleo luminoso.

La producción de este centelleo es debida a la transformación de la energía de las radiaciones en energía luminosa. Tal transformación se realiza en general de la siguiente manera: las radiaciones al incidir en la materia, interaccionan con ella transfiriendo su energía a electrones de la misma. Estos electrones, al adquirir esa energía se ponen en movimiento dentro del mismo material en el cual son frenados y como resultado de tal frenamiento liberan su energía bajo la forma de radiación electromagnética y si ésta queda dentro del espectro visible, puede ser observada como una luz.

Los contadores de centelleo tienen dos partes fundamentales, además del circuito electrónico asociado. (1) el tubo fotomultiplicador y (2) el cristal de centelleo.

Un tubo fotomultiplicador es un aparato en el que un impulso luminoso es convertido en una corriente eléctrica de intensidad apreciable. Un tubo de este tipo consiste en un fotocátodo, es decir, un electrodo en el que al incidir la luz se produce la emisión de uno o mas electrones, y varios ánodos con potenciales crecientes: un electrón que sale del fotocátodo es atraído por el primer ánodo y al incidir sobre éste, arranca otros electrones, los que a su vez son atraídos por el segundo ánodo en el que se repite el proceso y así sucesivamente.

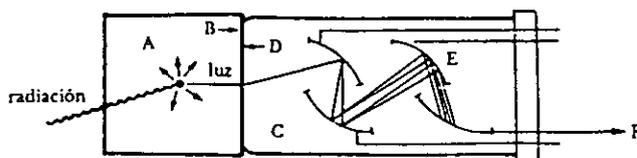
Los ánodos en este caso se llaman dinodos y como tales suelen usarse superficies pulidas de cobre-berilio o aleaciones de cesio-antimonio.

Con un buen número de dinodos las multiplicaciones logradas pueden ser el orden de 10^6 ó más, con lo que se tienen pulsos de suficiente tamaño para hacer funcionar circuitos electrónicos registradores.

La luz que incide en el fotocátodo puede ser la del centelleo similar al producido por la incidencia de una partícula alfa en una pantalla cubierta de ZnS. Las sustancias como ésta que producen centelleos luminosos al incidir radiaciones en ellas se llaman fósforos. El ZnS no se usa en los contadores de centelleo por ser muy opaco y absorber él mismo la luz producida, por tal razón, son preferibles los llamados cristales de centelleo, tales como los cristales de halogenuros alcalinos (NaI, KI, etc.) activados con Talio, Tungsteno de calcio (CaW4), etc.,

utilizándose también compuestos orgánicos amorfos como : antraceno, naftaleno, etilbenceno, etc.

La figura A.4 es un esquema de un contador de centelleo, notándose en ella que el cristal debe estar casi en contacto con el fotocátodo, el tubo fotomultiplicador se lleva a vacío para evitar absorciones y todo el conjunto se protege de la luz encerrándolo en un cilindro metálico, generalmente aluminio.



- A Cristal de centelleo
- B Contacto óptico
- C Tubo fotomultiplicador
- D Fotocátodo
- E Dinodos
- F Señal de salida

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Figura A.4.- Detector de centelleo y fotomultiplicador.

Los contadores de centelleo tienen grandes ventajas : proporcionan pulsos de buen tamaño, operan en la región de proporcionalidad y su eficiencia es muy buena por tener como material detector a un sólido. Por estas razones se utilizó en este estudio para la detección de los rayos gamma emitidos por el ^{22}Na .

En los contadores de centelleo, los pulsos que se obtienen a la salida del tubo fotomultiplicador tienen tamaños proporcionales a las energías de las radiaciones electromagnéticas incidentes en el fotocátodo que los originó.

Los contadores de centelleo, además del fósforo y el tubo fotomultiplicador, llevan un circuito electrónico asociado que consta de un preamplificador, un amplificador lineal, un analizador de pulsos y un registrador de pulsos.

Los contadores de centelleo son idóneos para detectar rayos alfa, beta y gamma, pero vamos a estudiar en especial únicamente el conteo de estos últimos debido a que el radioisótopo utilizado en el estudio de la migración de sales fue el ^{22}Na el cual emite rayos gamma de energía de 0.511 Mev.

Con un contador de centelleo detectamos rayos gamma monoenergéticos, que al incidir en el cristal de centelleo interactúan con éste mediante los siguientes procesos :

- a) Efecto fotoeléctrico- el rayo gamma transfiere toda su energía a un electrón atómico, éste escapa del átomo y libera su energía bajo la forma de luz, la cual produce un pulso. El tamaño del pulso es proporcional a la energía de los rayos gamma, y se llama fotopico. Todos los pulsos debidos al efecto fotoeléctrico tienen prácticamente el mismo tamaño, salvo pequeñas variaciones de tipo estadístico.
- b) Efecto Compton. El rayo es dispersado elásticamente por un electrón libre. Como resultado se tiene que el electrón adquiere una energía cinética y se ponen en movimiento dentro del detector en el cual es frenado y como resultado liberan su energía bajo la forma de radiación electromagnética; y si ésta queda dentro del espectro visible puede ser observada como una luz. En tanto que el rayo gamma es dispersado con menor energía que el incidente; tal rayo gamma puede a su vez interactuar con el detector, escapar de éste, o bien llegar al fotocatodo, en cuyo caso si tiene la energía adecuada puede originar un pulso. Como la energía del rayo gamma incidente se la reparten entre el electrón y el rayo gamma disperso siguiendo un proceso al azar, los pulsos debidos al efecto Compton tienen tamaños que varían en forma continua.

Producción de pares. Este proceso se presenta únicamente en el caso de que los rayos gamma tengan energías mayores de 1.02 Mev. En tal caso, los rayos gamma al interactuar con el campo eléctrico de un núcleo atómico desaparece, creándose un par positrón-electrón. El electrón producido cede su energía en el material de la misma manera que los producidos por efecto fotoeléctrico y Compton; mientras que el positrón al interactuar con un electrón de los átomos del material se aniquilan ambos, produciéndose dos fotones con energías mínimas de 0.511 MeV, cada uno.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

1. - Reyes Cortes. "Estratigrafía del Area del Templo Mayor Catedral Metropolitana". *Departamento de Prehistoria, INAH (1985), pp. 25-38.*
2. - Arnold, A. and Zehnder, K. "Crystallization and Habits of Salt Efflorescences on Walls. Part. II". *Conditions of Crystallization in 15th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Lausanne (1985), pp. 265-277.*
3. - Arnold, A. and Zehnder, K. "Salt Weathering on Monuments in the Conservation of Monuments in Mediterranean Basin". *F. ZEZZA, Bari (1989), pp. 31-58.*
4. - Zehnder, K. and Arnold, A. "Crystal Growth in Salt Efflorescence". *Journal of Crystal Growth 97 (1989), pp. 513 - 521.*
5. - Stanley, J. Tefond. *Industrial, Mineral and, Rock. 5th American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. Inc. New York (1983), pp. 1207 - 1223.*
6. - Rangel, I.R. y Martinez, MA. E. *Problemas de Química Básica, IPN, Vol. II (1990), pp. 11 - 15.*
7. - Ayres, H, Gilbert. *Análisis Químico Cuantitativo. Ed. Harper & Row Publisher (1968), pp. 95-111.*
8. - H. De Thory. "On the Method Proposed by Mr. Brard for the Immediate Detection of Stones Unable to Resist the Action of Frost". *Annales De Chemie Et de Physique, 38, (1928), pp. 160-192.*
9. - C.A.Price. "The Use of the Sodium Sulphate Crystallization Test for Determining the Weathering Resistence of Untreated Stone". *Building Research Station Architects Journal. 19. 78 (162) pp. 337-339. Rilem/UNESCO. Symposium Paris.*
- 10.- Marschner, Hannalore. "Application of Salt Crystallization Test to Impregnated Stones". *Institut Werksstoffwissens Chaften III Der Universitat Erlangen - Nurnberg. Marstensstrabe 5,8520 Erlange (Germany) (1973), pp. 3-25.*
- 11.- Philippe. "Le Traitement de Conservation de Facades au Musee Curtius a Liege". *Bulletin des Musees de Belgique, 1 (1958), pp. 101-102.*

- 12.- Butterworth, B. "Les Efflorescence su les Maconneries en Briques". *Silicates Industriels*. (1955), pp. 225-258, 309-312.
- 13.- Kieslinger, A. "Building Research Station Concrete in Sulphate Bearing Soils and Ground water" *Digest Second Series*, núm. 90, February (1968), pp. 1-6.
- 14.- T. Estambolov, J.R. Van Asperen De Boer. *El Deterioro y la Conservación de Materiales Porosos de Construcción de Monumentos. Una Revisión Bibliográfica. Traducción de Luis Torres Montes. UNAM, México, (1984), pp. 10-56.*
- 15.- Butterworth, B. "Some Striking Examples of Efflorescence on Brick Work". *Transaction of the VII th International Ceramic Congress, London, (1960), pp. 275-285.*
- 16.- H. Rosch And H.J. Schwarz. "Damage to Frescoes Caused by Sulphate Bearing Salts". *The Journal of International Institute for the Conservation of Museum Objecs. Thomas Nelson and Sons LTD. London, Edinburgh, Paris, Melbourne, Toronto and New York. Studies in Conservation, 38, (1993), pp. 224-230.*
- 17.- A. Arnold. "Determination of Minerals Salts from Monuments". *Thomas Nelson and Sons. LTD London, Edinburgh, Paris, Melbourne, Toronto and New York. Studies in Conservation, 28, (1984), pp. 129-138.*
- 18.- F. Pique, L. Dei And E. Ferroni. "Physicochemical Aspects of the Delicuescence of Calcium Nitrate and its Implications for Wall Painting Conservation". *Thomas Nelson and Sons. London, Paris, Melbourne, Toronto, Edinburgh and New York. Studies in Conservation. 37, (1992), pp. 217-227.*
- 19.- Arnold, A. "Nature and Reaction of Saline Minerals in the Conservation Stone. Vol. II, Ed. R. Rossi - Manaresi, Bologna (1981), pp. 13-23.
- 20.- Mora P. Mora, L. and Philippot, P. "The Conservation of Wall Painting". *Butterworth. London (1984), pp- 166-182.*
- 21.- Massari, G. "Humidity in Monuments". *ICCROM. Rome (1977), chapter 1.*
- 22.- Torraca, G. "Brick, Adobe, Stone and Architecture Ceramic Deterioration Processes and Conservation Practices in Preservation and Conservation". *Principles and Practices. Ed. Stimmons Smithsonian Institution. Press, Washington D.C. (1976), pp. 143-165.*

- 23.- Fockenberg, F. "Study on the Relationship Between Water Absorption and Crystallization Test for Impregnated Stone Materials". *Art and Archaeology Technical Abstracts, The Getty Conservation Institute. Vol. 30, n° 2 (1993), pp. 1984.*
- 24.- Charola, A. Elena and Weber, Johannes: "The Hydration Dehydration Mechanism of Sodium Sulphate". *Art and Archaeology Technical Abstract. The Getty Conservation Institute. Vol. 30, No. 2 (1993), pp. 1855.*
- 25.- McMahon, David J. Sanaberg, Paul, Folliard Kevin and Mehta, P.K. "Deterioration Mechanism of Sodium Sulphate". *Art and Archaeology, Technical Abstracts, The Getty Conservation Institute. Vol. 30, No. 2 (1993), pp. 1986.*
- 26.- Blanco, M. T. Puertas, F. Palomo, A. and Gómez, F. "Alteration of Mortars, Grounds and Plasters in Toledo Cathedral due to Humidity". *Art and Archaeology. Technical Abstracts, The Getty Conservation Institute. Vol. 30, No. 2 (1993), pp. 1815.*
- 27.- Skibinski, Slawomir. "Water-Soluble Salts". *Art and Archaeology. Technical Abstracts. New York. Vol. 29, No. 2 (1992), pp. 3016.*
- 28.- A. Arnold. "Determination of Minerals Salts from Monuments". *Studies in Conservation. Thomas Nelson and Sons. LTD London Edinburgh, Paris, Melbourne, Toronto and New York. Studies in Conservation, 29, (1984), pp. 129-138.*
- 29.- Plata Bedmar A. *Isótopos en Hidrología. Ed. Alhambra, S.A. Madrid (1972), pp. 44-49.*
- 30.- Choppin G. R. Rydberg J. *Nuclear Chemistry, Theory and Applications Pergamon Press, Oxford. (1980). pp. 404-406.*
- 31.- Navarrete, M. y Cabrera L. *Introducción al Estudio de los Radioisótopos. Segunda Edición 1993, UNAM, México, pp.162-163.*
- 32.- Kaufman, W.J. And Orlob, G. T. "An Evaluation of Ground-Water Tracers". *Trans. Am. Geophys. Unión, 37 (1956), pp. 297-306.*
- 33.- Jenning, A.R. and Schroeder, M.C. "Laboratory Evaluation of Selected Radioisotopes as Ground-Water". *Tracers, Water Res. Vol. 4, No. 4 (1968), pp. 829-838.*
- 34.- Anil, Kumar, de *The Synthetic Elements. Wiley Eastern Limited. 1979, New Delhi, pp. 19-45.*
- 35.- Jefferson S. *Radioisotopes, a New Tool for Industry. Newnes, 1957.*

- 36.- Kohl, J. Zentner R. D. and Lukens H. R. *Radioisotope Applications Engineering*. 1961, New York.
- 37.- Broda. E. and Shonfeld T. *The Technical Applications of Radioactivity*. Pergamon, 1966.
- 38.- Humpry John Moule Bowen. *Chemical Applications of Radioisotopes*. Chemistry Departament the University of Reading, 1969, Printed in Great Britain by Butler & Tanner, LTD, Frome and London pp. 18- 26
- 39.- Berg, E. W. *Physical and Chemical Methods of Separation*. McGraw Hill, New York, 1963.
- 40.- Anil, Kumar De. *The Synthetic Elements*. Wiley Eastern Limited. New Delhi, 1969, pp. 19-45.
- 41.- Choppin. G., R.; Rydberg J. *Nuclear Chemistry, Theory and Applicatios*. Pergamon Press, Oxford, 1980.
- 42.- Humpry John Moule Bowen. *Chemical Applications of Radioisotopes*. Chemistry Departament the University of Reading. Printed in Great Britain by Butler & Tanner Ltd. Frame and London, 1969.
- 43.- Rickards Campbell J. y Camaras Ross R. "Las Radiaciones II. El Manejo de las Radiaciones Nucleares. Fondo de Cultura Económica, (1990), pp.20-96, México.
- 44.- Ley Koo, Eugenio. "Tesis Radioisótopos: Teoria y Experimentación. B UAP FC, FM, 1959.
- 45.- Guía Oficial Tula. INAH-SEP (1968).
- 46.- Informe Proyecto Tula. C.R. Hidalgo, INAH (1991)
- 47.- Marquina, Ignacio. *Arquitectura Prehispánica. Tomo I INAH-SEP, México (1981), pp. 150-156.*
- 48.- Acosta, Jorge R. *Anales del INAH. Tomo VII y XIII, México, 1956 y 1961.*
- 49.- Informe de Inspección de la Zona Arqueológica de Tula. A/021, (Z461) 00/1, 1981.
- 50.- Informe de Inspección y Muestreo Zona Arqueológica de Tula. A/370, (Z 46-1) 00/1, 1988.
- 51.- Petersen R. y L. Calvin. "Sampling in Black Methods of Soil Analysis". *American Society of Agronomy (1965), Madison Wisconsin pp. 54 -74.*
- 52.- M.L. Jackson. *Análisis Químico de Suelos. 4a. Ed. Omega, S.A. Barcelona, España (1982), pp.123.*
- 53.- A. H. Roebuck. "Cleaning The Organic Way". *Chemical Engineering, July 31 (1978), p.p. 107-110.*