

23
2y



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
FES-ZARAGOZA

UN ENFOQUE BIOLÓGICO SOBRE LA MIGRACION
DEL RADIO (Ra-226) EN LOS ESTRATOS SOMEROS
SUBYACENTES EN EL DEPOSITO DE ESTERILES
(JALES) EN PEÑA BLANCA CHIHUAHUA.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

LICENCIADO EN BIOLOGIA

P R E S E N T A :

VIDAL PABLO ROJAS MARTINEZ

U N A M
FES
ZARAGOZA



LO ORGANIZÓ EN
SU INSTITUTO DE INVESTIGACIONES

DIRECTOR DE TESIS: M. EN C. HILARION SIMON CRUZ GALINDO

ABESOR DE TESIS: BIOL. LETICIA LOPEZ VICENTE

MEXICO, D. F.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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.

A MIS PADRES:

JOSE Y ENRIQUETA

Por todo el gran sacrificio que hicieron para darme todo lo que llegue a necesitar, desde - lo material, educación, pero lo más importante comprensión, cariño, apoyo moral y fé que depositaron en mí.

Sin todo esto no creo a ver llegado a la meta que fue el concluir mi carrera.
Que es de ustedes también.

Por todo esto mil gracias, y que dios los -- bendiga.

A MIS HERMANOS:

RICARDO, CRISTINA Y JOSEFINA.

Les doy gracias por el apoyo que me brindaron,
los días de desvelo en que me acompañaron, pe-
ro lo más importante su cariño de Hermanos que
me han demostrado.

Para ustedes este presente también es parte de
ustedes.

A MI ESPOSA:

M O N I C A

Por su confianza, y el entusiasmo para
alcanzar a realizarme como profesio- -
nista.

Mil gracias. Te amo.

A MI HIJA:

MARIANA ZELTZIN

Esto es parte de la herencia de
trabajo y cariño.

Te amo pequeña.

A LA BIOL. LETICIA LOPEZ VICENTE

Por su valiosa ayuda y asesoramiento
del trabajo.

Gracias.

AL ING. SIMON CRUZ GALINDO

Por sus sugerencias y apoyo para la
realización y culminación del trabajo.

A MIS COMPAÑEROS DE TRABAJO:

Por el apoyo brindado.

A MIS JEFES:

Por facilitarme el tiempo
necesario para la realización del trabajo.

INDICE

RESUMEN	1
CAPITULO I	
INTRODUCCION	
1.1 IMPACTO RADIOLOGICO AMBIENTAL	2
1.1.1 Definición de Impacto Ambiental e Impacto Radiológico Ambiental.	2
1.1.2 Características del Ra-226	4
1.2 ASPECTOS BASICOS DEL FLUJO DE FLUIDOS EN EL SUBSUELO	8
1.2.1 Ecuación General para el Flujo de Agua Subterránea	9
1.2.2 Factor del Movimiento de las Aguas Subterráneas (ley de Darcy).	10
1.2.3 Cálculo del Gradiente Hidráulico	12
1.2.4 Determinación de la Velocidad Real	12
1.2.5 Expresión para el Cálculo de la Tasa de Movimiento de Radionúcleidos en el Subsuelo (para flujo unidimensional).	15
1.3 METODO DE RESISTIVIDAD PARA EL CALCULO DE ESPESOR DE LAS CAPAS SUBYACENTES A LA ZONA DE DEPOSITO DE LOS ESTERILES.	
1.3.1 Resistividad Eléctrica de Minerales	16
1.3.2 Método de Resistividad y Ecuación Fundamental.	17
CAPITULO II	
ANTECEDENTES	21
2.1 CARACTERISTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO	
2.1.1 Ubicación	22
2.1.2 Vegetación	22
2.1.3 Clima	30
2.1.4 Geología	32
CAPITULO III	
JUSTIFICACION	37

CAPITULO IV	
HIPOTESIS DE TRABAJO Y OBJETIVOS	38
CAPITULO V	
METODO	
5.1 Estudio de la Zona	39
5.2 Selección del sitio de Depósito de Estériles	39
5.3 Transporte de los Esteriles y Protección personal	41
5.4 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).	42
CAPITULO VI	
RESULTADOS	
Resultados de los Sondeos Eléctricos Verticales	43
Gráficas	47
Tablas	60
Cuadros	63
CAPITULO VII	
DISCUSION	65
CAPITULO VIII	
CONCLUSIONES	67
REFERENCIAS	69

RESUMEN

Generalmente en la naturaleza existen varios factores que pueden alterar el medio ambiente incluyendo la población humana, sin embargo, existen prevenciones o soluciones a dichos problemas, por ejemplo: el impacto ambiental es un campo de estudio muy amplio, en él se encuentra el impacto radiológico ambiental, que tiene como fin estudiar lo relacionado a instalaciones nucleares, desechos radiactivos o cualquier isótopo radiactivo desde el punto de vista de la protección radiológica.

Este trabajo se realizó con el fin de comprender como los jales o estériles, productos de un proceso químico agresivo, pueden migrar en el subsuelo y/o afectar a la población, ya que los jales tienen concentraciones de Radio (Ra-226) y sus derivados. Este radionúclido de vida media larga (1600 años), se comporta química y físicamente como el Bario (Ba), por lo que es necesario saber las características físicas, químicas, biológicas, geológicas, hidrológicas y geográficas del lugar de alojamiento o depósito de los estériles.

En años anteriores se han realizado estudios de diversas disciplinas, para la localización y caracterización de la zona de Peña Blanca Chihuahua, lugar donde finalmente se depositaron las 44 mil toneladas de jales; siendo un lugar alejado de la población, donde no se practica la ganadería o agricultura, hay baja precipitación pluvial, bajo riesgo de sismos y niveles freáticos muy profundos (> 70 m).

Como se sabe que el Ra-226 migra por medio del agua; se propuso un método alternativo, económico y rápido para el cálculo de la velocidad real de migración del Ra-226, por medio de ecuaciones de mecánica de fluidos y basándonos en sondeos eléctricos verticales (SEV) se logró obtener la composición, espesor y profundidad de tres diferentes capas subyacentes del sitio de depósito e incluso la profundidad a la que se encuentre el agua subterránea.

Por cada una de las capas del subsuelo y por el recorrido total hasta las aguas subterráneas se estimó el tiempo que tarde el Ra-226 en migrar a una profundidad dada, además, se puede estimar el tiempo de recorrido del Ra-226 hasta llegar a los cuerpos acuáticos superficiales, y podemos afirmar que en el lapso de tiempo que tarde en llegar a los cuerpos acuáticos y/o al hombre, el impacto radiológico del Ra-226 es casi nulo o semejante al fondo natural. De manera gruesa estimamos que para recorrer 1000 m. se requiere de 31,746 años y como el Ra-226 tiene vida media larga, entonces habrán pasado 20 vidas medias, lo cual nos indica mínimo riesgo radiológico a la población, por este concepto.

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1 IMPACTO RADIOLOGICO AMBIENTAL

1.1.1 Definición de Impacto Ambiental e Impacto Radiológico Ambiental.

El término de **Impacto Ambiental** podría definirse como todo efecto positivo o negativo que se perciba en el conjunto de valores naturales, sociales y culturales existentes en un lugar y tiempo determinado. En base a esta definición, es evidente lo complejo que resulta el estudio del tema; ante todo, es necesario contar con un grupo interdisciplinario que incluya ingenieros, geógrafos, geofísicos, biólogos, economistas, físicos y sociólogos, entre otros, que trabajen en forma conjunta y sistemática (1).

Es fundamental comprender las delicadas relaciones que existen entre el hombre y la naturaleza, conocer los mecanismos mediante los cuales la acción de aquél altera el equilibrio biológico de un medio determinado y, de ser posible, evaluar su impacto sobre los diversos componentes del medio. La construcción de una carretera, el depósito de sustancias radioactivas, la apertura de tierras de cultivo, la creación de nuevas zonas urbanas o industriales, el uso de sustancias químicas para el control de plagas, la reposición de minerales en los suelos agrícolas por medio de la fertilización y otras acciones similares, producen ciertas modificaciones a las que se denominan, en conjunto **impacto ambiental** (2).

Una rama importante del **Impacto Ambiental**, es el **Impacto Radiológico Ambiental**, que estudia los efectos al medio ambiente por medio de instalaciones nucleares (centrales nucleares), los cementarios radiactivos (maquixco), o como en el tema de esta tesis, el lugar de depósito de estériles (jales) de uranio. Lo radiológico se relaciona a la contaminación o a la radiación que puede recibir la población. En nuestro caso demostraremos que debido al Radio (Ra-226) la dosis incorporada por tal grupo es prácticamente nula.

Ahora bien, se sabe que cualquier actividad humana ocasiona transformaciones, positivas o negativas, en las áreas circunvecinas, y en ocasiones tan grandes, que influyen decisivamente en los aspectos físicos, químicos y biológicos, e incluso en sus propias condiciones de vida. Con frecuencia el **impacto ambiental** ha sido irreversible y severo (2).

En otras palabras, el propósito de un impacto ambiental es evitar la degradación de la calidad del aire, agua, recursos del suelo y sistemas ecológicos en general, y apuntar hacia el mejoramiento de las condiciones globales de la vida. Los perjuicios y beneficios de una acción significativa deben ser previstos y examinados minuciosamente por las personas que tienen en sus manos las decisiones en la planeación, con objeto de que la población existente y la futura, sean influidas positivamente por los cambios que se produzcan en el área (3,4).

El alto grado de deterioro del medio, a consecuencia de contaminantes químicos o por radionúcleidos, implica, fundamentalmente que los contaminantes puedan llegar al hombre a través de la cadena alimenticia, al ingerir productos comestibles que hayan recibido su impacto. Afortunadamente, por ahora, este tipo de contaminación no representa molestia ni peligro alguno en el país; si bien los radionúcleidos son utilizados en medicina en investigación y en la industria en cantidades regulares y los ya no utilizables se depositan en cementerios radiactivos, hasta el momento no se han reportado casos de alerta (5).

Las propiedades físico-químicas de los suelos son muy importantes para determinar si un suelo puede ser útil para la disposición de desechos radiactivos, ya que determinan aspectos tales como el de circulación, propiedades de absorción, disipación del calor radiactivo, efectos químicos de la radiación y grado de aislamiento (6). El tiempo de transporte y la concentración de radionúcleidos en la biósfera dependerá de la interacción con su entorno y como migra de su contención (7).

Esta interacción ha sido representada usando el coeficiente de distribución, K_d , para suelo. El coeficiente de distribución se define como la concentración de soluto en una fase absorbidora dividida por la concentración del soluto en solución, sus unidades son ml/g. El valor del K_d de un radionúcleido representa la partición del soluto (Ra-226) entre el sólido y la solución, esto es aplicable a reacciones de equilibrio, como intercambio iónico (7).

1.1.2 Características del Ra-226

El radio es un metal electropositivo del grupo II A alcalinoterreos y sus compuestos son los más iónicos, es un emisor de radiación alfa y gamma (8).

El peso atómico del radio es 226.0254, su número atómico es de 88. El metal en estado puro tiene un color blanco brillante, y en poco tiempo oscurece al exponerse al aire, probablemente debido a la formación de nitritos. Algunas propiedades físicas importantes son:

punto de fusión	700°C
punto de ebullición	1700°C
densidad (20°C)	5.5 g/cm ³
calor latente de fusión	8.5 KJ/mol
calor latente de evaporación	113 KJ/mol.

Las propiedades físicas, químicas y radioquímicas del Ra-226 también son de importancia para el estudio de la migración y su decaimiento. Por lo que hay que saber, que el Ra-226 no es abundante en la naturaleza, actualmente se conocen 24 isótopos del radio, siendo el Ra-226 el isótopo de vida media más larga. Todos los isótopos del radio son radiactivos, sus números másicos están comprendidos entre 206 a 230 y sus períodos de desintegración varían de 0.003 a 1622 años (9).

Los radionúcleidos más importantes que puedan contaminar al medio y a través de éste al hombre, son los sales, que son el proceso o residuos del mineral de uranio, principalmente radio y sus descendientes. Este radionúcleido puede contaminar el agua de corrientes subterráneas o ser arrastrado por el agua de lluvia a corrientes superficiales. Además puede pasar al aire en forma de partículas de óxido de uranio (10, 11).

Dentro del organismo, el radio se comporta como el calcio, por tener similares propiedades físico-químicas, y su isótopo 226 es principalmente un emisor α , por lo que el órgano crítico para este radionúcleido es principalmente en la médula ósea y en el esqueleto (hueso mineral). En un hombre adulto el promedio es de 110 pg que corresponde a 0.05 pg de Ra/g de cenizas. (12, 13).

Las propiedades química-analíticas del Ra-226, son muy similares a las del bario (Ba), su estructura cristalina no es conocida, pero, por analogía con el bario se supone cúbica. Las sales de radio son blancas y luminiscentes bajo su propia irradiación alfa; colorean la flama al rojo carmín y en el espectro de flama, presentan bandas en tres intensidades a 676.63nm (nanómetros), 649.8nm y una factible a 660nm (10).

La forma más frecuente de coprecipitar al radio es como sulfato de bario. El sulfato de radio es más insoluble en agua que el sulfato de bario, es por ello que cuando el radio se encuentra en cantidades imponderables, es posible separarlo de otros elementos alcalinotérreos mediante su coprecipitación con sulfato de bario. (14, 15).

Las propiedades radioquímicas del Ra-226, indican que es miembro de la serie radiactiva natural del U-238, el Ra-226 es un radionúcleido emisor de partículas alfa con energías de 4.78 MeV (Mega electrón volt). (95%), 4.6 MeV (6%) y además emite radiación gamma con energías de 0.186 MeV (4%), 0.26 MeV, (0.007%), 0.42 MeV (2E-04%), 0.61 MeV (2E-04 %). Durante su decaimiento llega a un producto final estable que es el isótopo de Pb-206. (16), **Figura 1**. La dosis tolerada de radio es de 4E-08 $\mu\text{C}/\text{ml}$ (micro-curis/mililitro) en agua, 8E-12 $\mu\text{C}/\text{cm}^3$ en aire y 0.1 μC para el cuerpo. (17, 18).

El Ra-226 puede llegar fácilmente al hombre por vegetales contaminados, o a través de la transferencia del radionúcleido por las cadenas alimenticias. Por varias razones ecológicas, es importante obtener información acerca de la razón vertical de migración del Ra-226 en el suelo, una vez que ha sido depositado en un cementerio; la razón de migración determinara qué tanto permanece el radionúcleido dentro de la zona de raíces, donde pueden ser absorbidos por las plantas y entrar a la cadena trófica (posiblemente al hombre). Finalmente el tiempo en el cual el radionúcleido se incorpora a aguas subterráneas y con cierta probabilidad hacia agua potable (19).

El objetivo de este estudio es utilizar un método alternativo rápido y económico para la estimación del cálculo de tiempos de migración de radionúcleidos en estratos subterráneos o donde haya riesgo de un impacto radiológico a la población, por medio de la posible incorporación de agua contaminada (radiológicamente) o por la trama alimenticia que pueda consumir el ser humano (vacas, hierbas, etc.), resolviendo el caso de uranio y sus descendientes en el depósito de Peña Blanca Chihuahua. **Figura 2**.

El depósito de jales que contiene uranio y sus radionúcleidos asociados puede llegar a crear serios problemas ambientales. En el sitio seleccionado este riesgo ambiental se debe a que los jales contienen radionúcleidos que pueden migrar a través del subsuelo y agua subterránea y causar problemas a la salud humana, la ecología y la conservación de los recursos naturales: este estudio provee información técnica para que ayude a las autoridades gubernamentales a evaluar los riesgos ambientales de dicha decisión (4, 20).

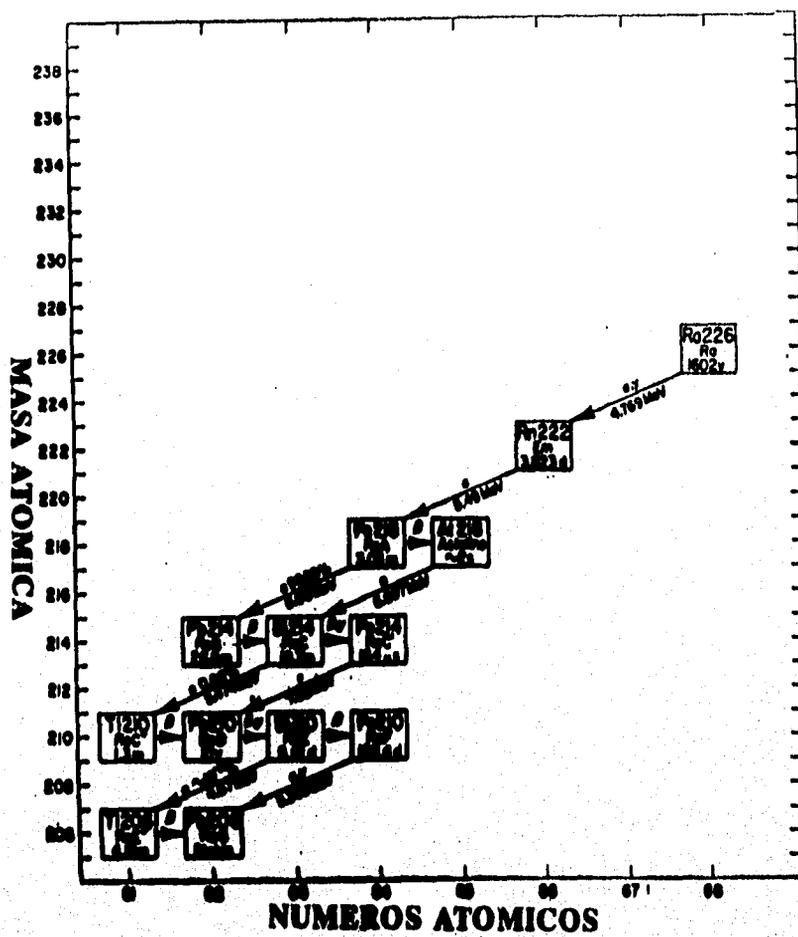


Figura 1. Radionúcleidos hijos generados por el decaimiento del Ra-226, llegando a un producto final estable que es el isótopo Pb-206.

RUTAS DE EXPOSICION



Figura 2. Posibles trayectorias del Ra-226 hacia aguas subterráneas y alimentos que puede consumir el humano. Cada una de estas trayectorias interviene de alguna manera con la cadena alimenticia del hombre. a)jales, b)ganado, c)pozo de agua potable, d)agua subterránea, e)plantas y animales f)lago o laguna y g)suelo.

Se tiene un conocimiento detallado de las condiciones físicas del sitio de depósito de los jales y de la microcuenca donde éste se ubica. Este conocimiento permitió estimar el riesgo potencial de contaminación ambiental resultante de este depósito y establecer el grado de seguridad para su confinamiento a largo plazo. Además se realizaron estudios de geología, geofísica, hidrología, geotécnica, flora y fauna regional (4).

El estudio geológico permitió identificar las rutas de migración de los radionúcleidos disueltos en las aguas que pudiesen identificarse en el subsuelo. La geofísica tuvo por objeto cuantificar el espesor del aluvión subyacente al sitio, lo que sirvió para predecir los tiempos de tránsito de los contaminantes disueltos. La caracterización hidrológica de la cuenca fue de utilidad para identificar los factores que determinan las cantidades de agua de escurrimiento que podrían transportar los contaminantes fuera de la cuenca. Los análisis geotécnicos fueron para evaluar la aptitud de las arcillas accesibles al sitio para confinar los jales, además de aportar elementos cuantitativos para evaluar el funcionamiento hidráulico del depósito. El estudio de la flora y fauna permitió identificar a los animales y vegetales predominantes y cuales de ellos son consumidos por el hombre o que son parte de un eslabón de una cadena alimenticia para el humano (21).

1.2.-ASPECTOS BASICOS DEL FLUJO DE FLUIDOS EN EL SUBSUELO.

En el estudio de flujo de fluidos en medios porosos, es importante el transporte de radionúcleidos dentro de estratos geológicos y en la parte menos profunda del horizonte del suelo, para conocer la migración de dichos radionúcleidos por las diversas trayectorias de los suelos (subsuelo).

Aplicando las ecuaciones del flujo de fluidos en medios porosos (ley de Darcy) se encuentra la velocidad real del radionúcleido (Ra-226); en estos estratos y con este valor se estime el tiempo que tardaría en llegar a los depósitos o afluentes superficiales o subterráneos de agua. Como es importante el estudio del Impacto Ambiental en cualquier instalación nuclear y radiológica, se tome este aspecto para definir, que por esta ruta de incorporación al hombre no existe ningún riesgo radiológico por una posible dosis a la población vecina (22), Figura 2.

En el caso de la migración del Ra-226 se considera como material con alto contenido de jales o estériles, que se depositan en una zona lejana a los centros de población con presencia de minerales de uranio natural y escasa precipitación pluvial. Cerca del sitio de depósito no se encuentran fallas activas, y por medio de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y modelos Matemáticos es posible encontrar el espesor de las capas de suelo a profundidades someras.

1.2.1. Ecuación general para el flujo de agua subterránea.

Esta ecuación se basa en el principio de conservación de la masa y se considera un medio poroso, la variable fundamental es el gradiente hidráulico h .

$$\nabla^2 h - 2g\beta\rho \frac{(\partial h)}{(\partial z)} = \frac{Ss}{K} \frac{(\partial h)}{(\partial t)} \dots \dots \dots (1)$$

- g = gravedad
- β = módulo de elasticidad
- ρ = densidad del medio
- h = gradiente hidráulico
- $Ss = \rho g [(1-n) \alpha + n \beta]$
capacidad de almacenamiento específico
- K = conductividad hidráulica

$$\text{donde} \dots \dots \nabla^2 = \nabla \cdot \nabla = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \dots \dots \dots (2)$$

desde el punto de vista físico:

- $\nabla^2 h$ = variación en el espacio del gradiente hidráulico
- $\partial h / \partial z$ = variación del gradiente hidráulico con la profundidad.
- $\partial h / \partial t$ = evolución en el tiempo del gradiente hidráulico.

lo que nos dá una descripción completa del movimiento del flujo, y en ella vemos que se incluyen todos los parámetros importantes físicamente en el problema de flujo de fluidos. Para flujo no confinado $\partial h / \partial t$ se puede despreciar y si el gradiente de h con respecto a la profundidad formalmente se desprecia llegamos a la llamada ecuación de Laplace (23).

$$\nabla^2 h = 0 \dots \dots \dots (3)$$

que es la ecuación general a resolver para flujo provenientes de un potencial. Suponiendo que h es una función potencial sabemos que la velocidad del flujo puede ser conocida si

$$V = -\nabla h \dots \dots (4)$$

$$\text{Operador...nabla...} \nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k \dots \dots (5)$$

ó salvo una constante

$$V = -K \nabla h \dots \dots (6)$$

para este caso, se trabaja de manera empírica para que los cálculos sean directos. En vista de que se trabaja con una fuente potencial que es medible en campo utilizaremos variables que se utilizan en la ingeniería hidráulica (23).

1.2.2. Factor del movimiento de las aguas subterráneas

El agua subterránea se desplaza desde los niveles energéticos más altos a los más bajos, por lo que su energía procede esencialmente de las diferencias de nivel y de presión. El agua experimenta una pérdida de energía debido al rozamiento con las superficies del medio granular a través del que circula, esta pérdida por unidad de longitud de la distancia recorrida (o gradiente hidráulico) es proporcional a la velocidad del agua subterránea. Cuando la proporcionalidad entre el gradiente hidráulico y la velocidad del agua se expresa en términos matemáticos, se obtiene una ley lineal conocida con el nombre de ley de Darcy. El movimiento de las aguas subterráneas se rige mediante los siguientes factores hidrodinámicos (24):

El **gradiente hidráulico**, "h" ; número sin dimensiones, es la pérdida de carga por unidad de longitud, es decir, es la pendiente de la superficie piezométrica si se acepta que los hilillos sobre una misma vertical son paralelos entre ellos.

La **velocidad real**, V_w , del flujo de las aguas subterráneas se refiere a la sección real de flujo determinada por la porosidad eficaz m_e y K coeficiente de permeabilidad.

$$V_w = \frac{Q}{Am_e} = \frac{Kh}{m_e} \dots \dots \dots (7)$$

Si A es la superficie total de la sección flujo en m^2 y Q es el caudal del flujo de las aguas subterráneas en m^3/s . La velocidad real es mayor que la velocidad media obtenida según la fórmula de Darcy:

$$V = \frac{Q}{A} = Kh \dots \dots \dots (8)$$

Estas dos velocidades se relacionan según la ecuación:

$$V_w = \frac{V}{m_e} \dots \dots \dots (9)$$

El **caudal de flujo Q**, es el volumen de agua en m^3 que atraviesa una sección total de la capa acuífera (en m^2), normal a la dirección de flujo, en la unidad de tiempo (un segundo). Se expresa en m^3/s (25).

El **caudal unitario**, q, es el caudal que atraviesa en una unidad de tiempo (el segundo) la unidad de dimensión de la capa acuífera tomada como referencia, superficie (m^2), longitud (m), o potencia H (m). Se expresa en $m^3/s/m^2$ o en $m^3/s/m$. Tenemos

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{H} \dots \dots \dots (10)$$

1.2.3. Cálculo del gradiente hidráulico.

En la práctica, el gradiente hidráulico se calcula a partir de los niveles de piezométricos. Así pues, tenemos, sobre un hilillo líquido:

$$h = \frac{H_1 - H_2}{L} \dots\dots\dots(11)$$

H_1 es el nivel piezométrico de la parte superior, en m;

H_2 es el nivel piezométrico de la parte inferior en m;

L la distancia entre los dos puntos H tomada sobre el hilillo líquido en m.

Esta medición se puede efectuar o bien sobre el terreno con ayuda de pozos, sondeos o piezómetros, o bien sobre los mapas piezométricos. Este último método es el más sencillo y el único que permite determinar el gradiente hidráulico medio.

1.2.4. Determinación de la Velocidad Real

La velocidad real del flujo se puede determinar:

- aplicando la ley de Darcy;
- realizando mediciones in situ con ayuda de marcadores.

Cálculo de la velocidad real mediante la ley de Darcy. Conociéndose el coeficiente de permeabilidad de Darcy, k , en m/s, el gradiente hidráulico h y la porosidad eficaz m_e , podemos calcular la velocidad real aplicando la ley de Darcy, (ecuaciones 8 y 9):

$$V_w = \frac{Kh}{m_e} \dots\dots\dots(12)$$

La velocidad real del flujo es muy baja, en especial en los mantos cautivos.

Cálculo del caudal por la ley de Darcy.

Conociéndose el coeficiente de permeabilidad de Darcy, K , en m/s y el gradiente hidráulico h , se puede aplicar la fórmula de Darcy: (25).

$$q = Kh \dots \dots \dots (13)$$

El movimiento del agua subterránea depende del tiempo, de los límites de la región o dominio del movimiento y de las propiedades del medio y del fluido. El movimiento puede ser evaluado cuantitativamente conociendo la velocidad, presión, densidad, temperatura y viscosidad del agua en su recorrido a través de la formación geológica, estas características constituyen habitualmente las incógnitas del problema, las cuales pueden variar en cada punto de la formación y con el tiempo (26).

Las rocas y el suelo constituyen el medio poroso por el que circula el agua subterránea, este medio poroso tiene un esqueleto, constituido por una agregación de granos de minerales sólidos, separados y rodeados por huecos, poros o intersticios, los cuales pueden estar llenos de agua, de gases o de materia orgánica. En un volumen V_0 total dado, el medio poroso está constituido por un volumen V_s de sólidos y un volumen V_v de huecos. La porosidad Φ se define como (27);

$$\Phi = \frac{V_v}{V_0} \dots \dots \dots (14)$$

La porosidad de los materiales consolidados depende del grado de cementación y del estado de disolución y de fracturación de la roca; la porosidad de los materiales sueltos depende del grado de compactación de los granos, de su forma, de su tipo de empaquetamiento y de su distribución por tamaños. La porosidad es una medida de la capacidad acuífera de un medio para la transmisión del agua, también hay otros factores que afectan a la conductividad, como el tamaño de los poros es del mismo orden de magnitud que el tamaño de los granos, este factor será mucho más importante que la misma porosidad a efectos de la conductividad hidráulica del medio (25, 28).

Tanto las arenas de grano relativamente redondeado como las de forma angulosa tienen una porosidad menor que las arcillas, las cuales están constituidas por partículas laminares de amplia superficie específica que origina la presencia de altas fuerzas moleculares entre el agua y las partículas de arcilla. Por ello, a pesar de su menor porosidad, los materiales arenosos son permeables y buenos acuíferos (23).

Los intercambios iónicos en las arcillas y en las superficies coloidales pueden producir cambios de volumen en los materiales del medio, lo que a su vez influirá sobre el tamaño y forma de los poros; cualquier movimiento del agua facilita la disolución o precipitación de componentes disueltos, los cambios de presión o temperatura relativamente bajos pueden producir la liberación de los gases que obstruyen el espacio poroso, disminuyendo así la conductividad hidráulica del medio (23, 24).

En sedimentos ricos en arcilla, la permeabilidad para el aire puede ser más de 100 veces superior a la que presentan para el agua. La detección y evaluación de la concentración de estos radioisótopos se efectúan por medidas de radiactividad. Sus características esenciales son la intensidad y la variación de la radiactividad en función del tiempo o período. La medición de la radiactividad se basa en el número de desintegraciones por segundo (27).

Los factores mayores que controlan la tasa de migración de radioisótopos en acuíferos son;

- a) El tipo y concentración del radionúclido
- b) La velocidad del agua
- c) Las especies iónicas y su concentración en el agua
- d) Las características adsorptivas del medio, y
- e) La porosidad del acuífero

El medio tenderá a absorber radioisótopos ionizados del agua, ellos serán desalojados por otros iones estables en el agua subterránea que están compitiendo por el espacio ocupado por los radionúclidos. Así, a mayor concentración de iones, los radioisótopos se moverán más rápido en desplazamientos sucesivos (5, 29).

1.2.5. Expresión para el cálculo de la tasa de movimiento de radionúcleidos en el subsuelo (para flujo unidimensional).

Una expresión aproximada para saber la tasa de movimiento de radionúcleidos dentro de un flujo unidimensional de agua subterránea es:

$$V_i = \frac{V_w}{1 + K_d \frac{\rho}{\phi}} \dots \dots \dots (15)$$

donde;

- V_i = velocidad del radionúcleido en el medio
- K_d = coeficiente de distribución
- V_w = velocidad del agua en el subsuelo
- ϕ = porosidad
- ρ = densidad aparente del sustrato.

Físicamente el coeficiente de distribución se puede entender como una medida de la distribución de las especies iónicas entre la fase líquida (agua) y la fase sólida (suelo) que tiende a absorber al ión. Un coeficiente de distribución alto indica una fuerte tendencia a la absorción (30, 31).

El coeficiente de distribución es una variable que es unívocamente determinada para sólo un conjunto de condiciones físicas y químicas.

Haciendo uso de la ecuación 15 y tomando en cuenta los valores de campo podemos tener un método sencillo y rápido para encontrar las velocidades de migración del Ra-226.

1.3 METODO DE RESISTIVIDAD PARA EL CALCULO DE ESPESOR DE LAS CAPAS SUBYACENTES A LA ZONA DE DEPOSITO DE LOS ESTERILES.

1.3.1 Resistividad eléctrica de minerales

En la prospección eléctrica se hace uso de tres propiedades fundamentales de las roca. Una es la **Resistividad** o inversa de la conductividad que condiciona la cantidad de corriente que atraviesa una roca al serle aplicada una determinada diferencia de potencial. La resistividad eléctrica de cualquier material se define como la resistividad, expresada en ohmios, entre las caras opuestas de un cubo unidad de ese material. Si la resistencia de un cilindro conductor de longitud l y área transversal S en R la resistividad ρ , viene expresada por la fórmula (27);

$$\rho = \frac{RS}{l} \dots \dots \dots (16)$$

La unidad de resistividad en el sistema métrico decimal es el ohmio por centímetro. La intensidad I de la corriente está relacionada con el voltaje aplicado V , y la resistencia R , por la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{R} \dots \dots \dots (17)$$

La conductividad σ de un material se define por longitud sobre resistividad (l/ρ), que es la inversa de su resistividad. La segunda es la **Actividad electroquímica** respecto a los electrólitos presentes en el suelo, que es la base de los métodos de autopotencial, depende de la composición química de las rocas, y también de la composición y concentración de los electrólitos disueltos en el agua del suelo, con los cuales están en contacto. De ello depende la magnitud y signo del voltaje engendrado cuando el material rocoso está en equilibrio con un electrólito.

La tercera es una **Constante dieléctrica**, que informa de la capacidad de un material lapídeo para almacenar una carga eléctrica, y que ha de ser tenida en cuenta cuando se introducan en el suelo corrientes alternas de alta frecuencia, como se hace en las técnicas de prospección por inducción. La constante dieléctrica que corresponde a la permeabilidad de los materiales magnéticos es la medida de la polarizabilidad de un material en un campo eléctrico (27).

1.3.2 El Método de Resistividad y Ecuación Fundamental

El Método de Resistividad es valioso por que proporciona una medida cuantitativa de las propiedades conductoras del subsuelo, esta técnica puede ser empleada para hallar las profundidades a que se encuentran capas del subsuelo que tienen conductividades anormalmente bajas o elevadas, y para determinar la profundidad y forma aproximada de masas minerales discretas con resistividad anómala (irregular). El procedimiento básico consiste en medir el gradiente del potencial en la superficie, asociado a una corriente de intensidad conocida que circula por el suelo. Las irregularidades de la conductividad por debajo de la superficie influyen en la relación entre la corriente y la caída de potencial en la superficie (25, 27).

El fundamento de todas las técnicas de resistividad de uso general, requieren la medida de la resistividad aparente. Para comprender este concepto, supongamos un sólido semiinfinito con resistividad uniforme ρ . Supongamos que en este material se introduce una corriente I mediante electrodos situados en A y B, respectivamente, sobre su superficie, Figura 3.

Supongamos, también, que el gradiente de potencial asociado a esta corriente es medido entre otros dos electrodos C y D sobre la misma superficie, el potencial en el electrodo C será;

$$V_c = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \dots \dots \dots (18)$$

en donde r_1 es la distancia entre el electrodo de potencial C y el electrodo de corriente A, y r_2 su distancia comprende al electrodo de corriente B, y al del potencial en el C esto es;

$$V_D = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \dots \dots \dots (19)$$

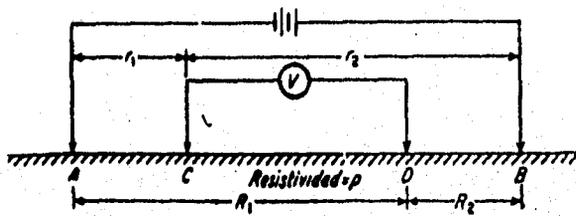


Figura 3. Disposición de los electrodos de corriente (A y B) y de los electrodos de potencial (C y D), (usados en campo).

en donde R_1 es la distancia de D a A, y R_2 la distancia de D a B. La diferencia de potencial V , medida con un potenciómetro entre los electrodos C y D es, sencillamente, $V_C - V_D$. Restando ambas ecuaciones, y despejando ρ , tendremos;

$$\rho = \frac{2\pi V}{I \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} \dots\dots\dots(20)$$

Este valor es independiente de las posiciones de los electrodos y no es afectado cuando son intercambiados los electrodos de corriente y de potencial. Cuando la resistividad no es constante a través del medio, la resistividad efectiva calculada empleando la anterior ecuación varía con la posición de los electrodos.

Si los electrodos son dispuestos a lo largo de una línea, y se van aumentando las separaciones de una manera sistemática, la variación de ρ con el espaciado de los electrodos hace posible, en muchos casos sencillos, determinar la variación de la resistividad con la profundidad; la resistividad de la ecuación anterior se designa ahora con el nombre de resistividad aparente (27).

Para explicar cómo se aplica este concepto, supongamos que el subsuelo está formado por dos capas, la superior con una resistividad ρ , y la inferior con una resistividad ρ_1 , menor que ρ . La corriente entre los electrodos A y B no discurrirá según arcos circulares, las líneas de flujo están deformadas hacia abajo como se ve en la Figura 4, porque la mayor conductividad por debajo de la superficie de contacto facilita el paso de la corriente en el interior de la zona más profunda. Por la misma razón, la corriente total es más intensa de lo que sería si el material de arriba se extendiera hacia abajo, hasta el infinito.

Además, cuanto más profunda esté la superficie de contacto, menor será el aumento en el flujo de corriente, mientras que cuanto mayor sea la separación de los electrodos en comparación con la profundidad de la superficie de contacto, mayor será el efecto ejercido por el sustrato de baja resistividad sobre la corriente que circula entre los electrodos (28).

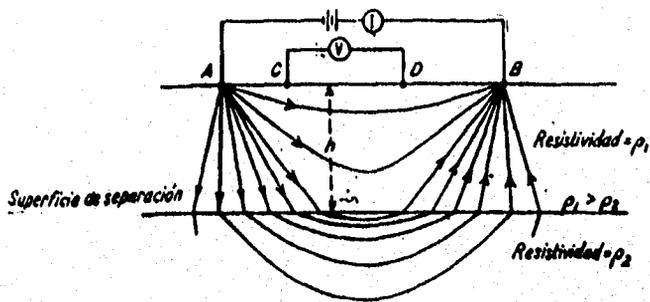


Figura 4. Líneas de flujo de corriente entre los electrodos A y B en un suelo formado por dos capas, teniendo la capa más profunda mayor conductividad, (usado en campo).

CAPITULO II

ANTECEDENTES

Desde el año 1970 se han venido realizando estudios de reconocimiento y prospección geológica en la Sierra Peña Blanca, los cuales sirvieron como base para la selección de un sitio específico, donde se efectuará el depósito e inmovilización de los jales, tomando en cuenta la estabilidad del terreno y la gran profundidad a la que se halla el nivel freático regional.

Por ejemplo, el saber que cantidad de radiación se presenta como fondo natural y cuanto después del depósito, y tener así un conocimiento detallado de las condiciones físicas, químicas y biológicas del sitio de depósito e incluso de la microcuenca donde ésta se ubica.

Como los esteriles o jales son los residuos de la llamada torta amarilla de un proceso químico agresivo, que fueron procesados en la planta de beneficio de ciudad Aldama con uranio natural, son considerados material con alto grado de contaminación, debido a que, es uranio, radio y sus descendientes de vida media larga y por medio de estas medidas fue necesario estudiar la zona, donde es posible depositar los jales, ya que estos llegan a crear serios problemas ambientales.

En el sitio seleccionado, este riesgo ambiental se debe a que los jales contienen radionúcleidos que pueden migrar a través del subsuelo hasta las aguas subterráneas y causar problemas a la salud humana, la ecología y la conservación de los recursos naturales: este estudio provee a la vez información técnica para que ayude a las autoridades gubernamentales a evaluar los riesgos ambientales de dicha decisión, en un futuro.

Todas las características mencionadas y con la intervención de varias disciplinas de la ciencia nos ayudaron a comprender la migración del (Ra-226), las cuales proporcionaron datos importantes para el estudio, es decir un estudio geológico permite identificar las rutas de migración de los radionúcleidos disueltos en las aguas que pudiesen identificarse en el subsuelo. La geofísica tuvo por objeto cuantificar el espesor del aluvión subyacente al sitio, lo que sirvió para predecir los tiempos de tránsito de los contaminantes disueltos.

La caracterización hidrológica de la cuenca es de utilidad para identificar los factores que determinan las cantidades de agua de escurrimiento que podrían transportar los contaminantes fuera de la cuenca. Los análisis geotécnicos son para evaluar la aptitud de las arcillas accesibles al sitio para confinar los jales, además de aportar elementos cuantitativos para evaluar el funcionamiento hidráulico del depósito.

El estudio de la flora y fauna permite identificar a las spp. vivientes y saber de esa manera cuales son los que intervienen para el consumo en una cadena alimenticia para el humano. Estas y otras disciplinas proporcionan la información requerida para un estudio de impacto radiológico ambiental.

2.1 CARACTERISTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1.1 Ubicación.

La planta de beneficio de uranio localizada en la vecindad de la población de Aldama, en el estado de Chihuahua **Figura 5**, operó entre los años de 1979 a 1983, y generó aproximadamente 44 mil toneladas de jales que fueron depositados en patios de la misma planta. Estos jales emiten radiactividad en dosis muy bajas que no son consideradas dañinas para el ser humano, flora y fauna; sin embargo, la ingestión de uranio y sus radionúcleidos asociados sí pueden ocasionar problemas de salud y, por tanto, los jales de beneficio de uranio son clasificados como residuos peligrosos. Ante el riesgo potencial que los jales representan para la salud de la población y el riesgo de contaminación de los recursos naturales, la Secretaría de Energía (SE), a través del Fideicomiso de Fomento Minero (FIFOMI), decidió realizar el traslado de los jales hacia un sitio donde su impacto negativo fuese inapreciable para todo fin práctico **Figura 6** (4, 32).

El sitio de estudio es Peña Blanca que está a 55 Km al norte de la ciudad de Chihuahua. Existen dos rutas de acceso al área de estudio: la primera es un camino de terracería que parte de la población de Aldama hacia el norte, con un recorrido de 47 Km. La otra cruza el ejido El Sauz, que se encuentra a 7 Km. al oriente de la desviación del kilómetro 55 de la carretera federal No. 45, en el tramo de Chihuahua a Juárez, continuando 12 Km al norte por un camino pavimentado hasta la colonia Nuevo las Delicias, de donde prosigue 37 Km al noreste por un camino de terracería **Figura 7**.

2.1.2 Vegetación

De acuerdo con la clasificación de Köppen, el clima en la región es continental seco, con una estación lluviosa muy marcada en los meses de Julio, Agosto y Septiembre. La precipitación media anual es aproximadamente 300 milímetros (mm), y la temperatura media anual es 18°C. La evapotranspiración potencial es superior a los 2000 mm. anuales (33).



Figura 5. Planta de beneficio para el tratamiento de uranio que generó jales, los cuales fueren depositados en patios de la misma planta (periodo 1979-1983).

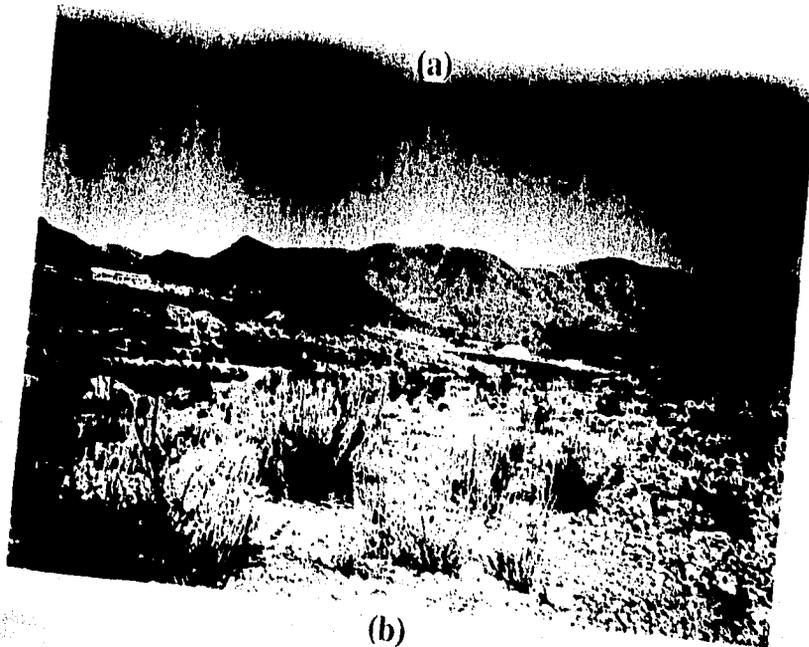


Figura 6. Morfología Biológica y Geofísica del sitio donde se depositaron los jales; lugar donde el impacto radiológico es en su totalidad inapreciable.

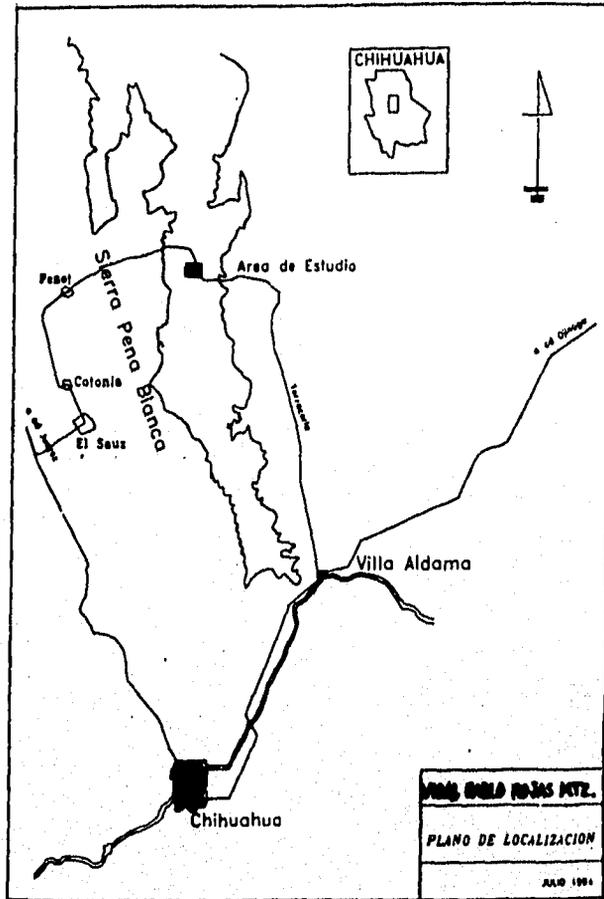


Figura 7. Localización Geográfica de Villa Aldama, del área de estudio Peña Blanca y las dos posibles vías de acceso.

Los suelos más abundantes en la microcuenca son los feozems, los cuales presentan una capa superficial oscura de textura media y rica en materia orgánica y nutrientes. Usualmente, estos suelos se encuentran en laderas y se erosionan con facilidad. También se encuentran presentes los regosoles, que son suelos con un perfil muy uniforme y comúnmente son de color claro.

La vegetación está compuesta por Pastizales naturales y Matorral Xerófilo que se caracterizan por tener de un 30 a 70% de especies espinosas. El matorral xerófilo es de zonas áridas y semiáridas comparable con la categoría de "desert", abarca además la de "Chaparral" ocupa aproximadamente 40 % de la superficie del país y por consiguiente es el más vasto de todos los tipos de vegetación de México (34).

El matorral xerófilo cubre la mayor parte del territorio de la península de Baja California, así mismo es característico de muy amplias áreas de la altiplanicie, desde Chihuahua y Coahuila hasta Jalisco. El clima es relativamente fresco en las partes más altas del altiplano, la temperatura media anual varía de 12 a 26°C; en general el clima es extremo, en particular durante el día (promedio anual de oscilación diurna hasta de 20°C) (33).

Los vientos fuertes por lo común no son frecuentes, pero en los primeros meses del año pueden provocar tempestades serias por la cantidad de partículas de suelo que levantan y que llevan en suspensión. La precipitación media anual es en general inferior a 700 mm. y en amplias extensiones está comprendida entre 100 y 400 mm.

Los matorrales xerófilos se pueden observar prácticamente en todo tipo de condiciones topográficas. Los tipos de suelo en general son los de drenaje deficiente, así como los francamente salinos, alcalinos y yesosos. La coloración del suelo es frecuentemente pálida, grisácea, aunque también los hay rojizos y de color castaño. El pH varía por lo común de 6 a 8.5, el contenido de materia orgánica suele ser bajo, en cambio los nutrientes en general se hallan en abundancia y el calcio casi siempre está en muy grandes cantidades **Figura 8.**

La textura es muy variable, los suelos arenosos en las zonas áridas son con frecuencia más favorables para las plantas, debido a que por su porosidad facilitan una rápida infiltración del agua y reducen el escurrimiento (7).

En el perfil del suelo se encuentra muchas veces un horizonte de concreciones de carbonato de calcio más o menos continuo, llamado localmente "Caliche": este horizonte falta cuando la roca madre es pobre en calcio, por lo cual, la hojarasca falta casi absolutamente en la superficie.



Figura 8. La Topografía del suelo de matorral xérofilo, a) superior, son de drenaje deficiente, de suelos salinos, alcalinos y de colores pálidos, grisáceos, b) inferior, la lechuguilla, hay escasa vegetación y poca materia orgánica con abundancia de calcio.

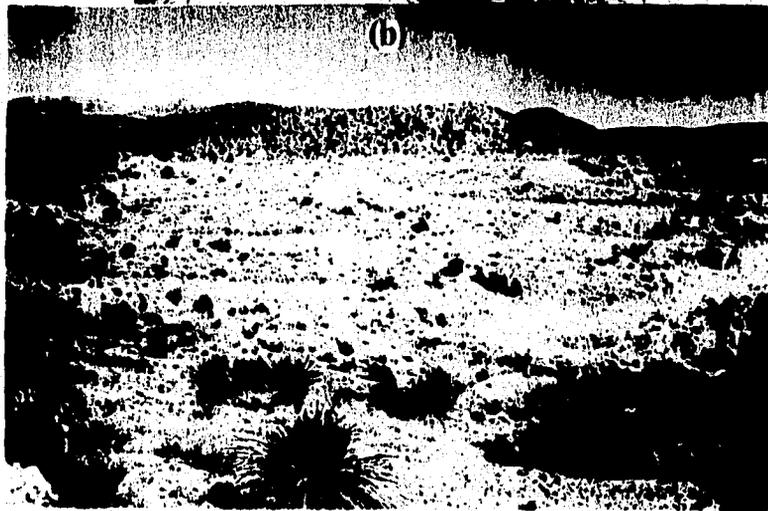


Figura 8. La Topografía del suelo de matorral xerófilo, a) superior, son de drenaje deficiente, de suelos salinos, alcalinos y de colores pálidos, grisáceos, b) inferior, la lechuguilla, hay escasa vegetación y poca materia orgánica con abundancia de calcio.

Los matorrales xerófilos considerados en conjunto, son quizá de las comunidades menos afectadas por las actividades del hombre, no son favorables ni al desarrollo de la agricultura, ni al de una ganadería intensiva y el aprovechamiento de las plantas silvestres es asimismo limitado. La densidad de la población humana se mantiene en general baja y algunas regiones se encuentran casi completamente despobladas. Lo que más frecuentemente se practica, es la ganadería, los animales más comunes son las reses, caballos, burros y borregos.

La altura de los matorrales xerófilos suele variar de 15 cm. a 4 m. y a veces hay eminencias aisladas que llegan hasta 10 m. de alto, como es el caso de algunas cactáceas gigantes, de algunas especies de *Yucca* y de otras plantas de porte más o menos arborescentes.

El aspecto de los matorrales xerófilos durante la época desfavorable del año varía, las que están constituidas por hojas deciduas ofrecen una apariencia gris-negruzca muy desolada durante el periodo de sequía, pero cuando entran en su composición cactáceas grandes u otros elementos perennifolios, como *Yucca*, *Agave*, *Dasylium*, *Gochnatia*, etc. su verdor influye notablemente en el semblante de la comunidad, que aparece mucho más alegre.

Este matorral está muy bien caracterizado, predominan especies con hojas agrupadas en forma de roseta, *Larrea tridentata* ("gobernadora") **Figura 9b**, *Agave lecheguilla* ("lecheguilla") **Figura 8b**, que forman un estrato subarborescente espinoso y perennifolio a menudo bastante denso, debido a la reproducción vegetativa de muchos de sus componentes (35).

En el desierto de Chihuahua se localizan los matorrales de ("gobernadora") *Larrea divaricata*, ("maqueyales") *Agave asperima* y ("nopaleras") *Opuntia* spp. acompañados de cactáceas y arbustos pequeños, así como, ("huizachillos") *Acacia* spp. y ("sangregada") *Jatropha dioica*, que se pueden considerar como bioindicadores de la flora de esta región (36).

La cubierta vegetal del área es pobre y se reduce a medida que la pendiente aumenta, las áreas con pendientes menores de 10% muestran una cubierta vegetal de 29.9%, mientras que la cubierta vegetal de las áreas con pendientes de 10 a 30% y mayores de 30% es de 16.7% y 7.7%, respectivamente. Estas áreas están tan sobrepastoreadas que las plantas herbáceas han sido prácticamente eliminadas y solamente quedan plantas leñosas, principalmente *Prosopis glandulosa* ("Mesquite") y especies de los géneros *Acacia*, *Opuntia* y otras especies de los matorrales comúnmente encontrados en la región, **Figura 9a**. El mayor sobrepastoreo ocurre cerca de las fuentes de agua y los lugares donde el ganado pueda encontrar sombra, algunas de las áreas más planas están siendo invadidas por la gobernadora. (37).

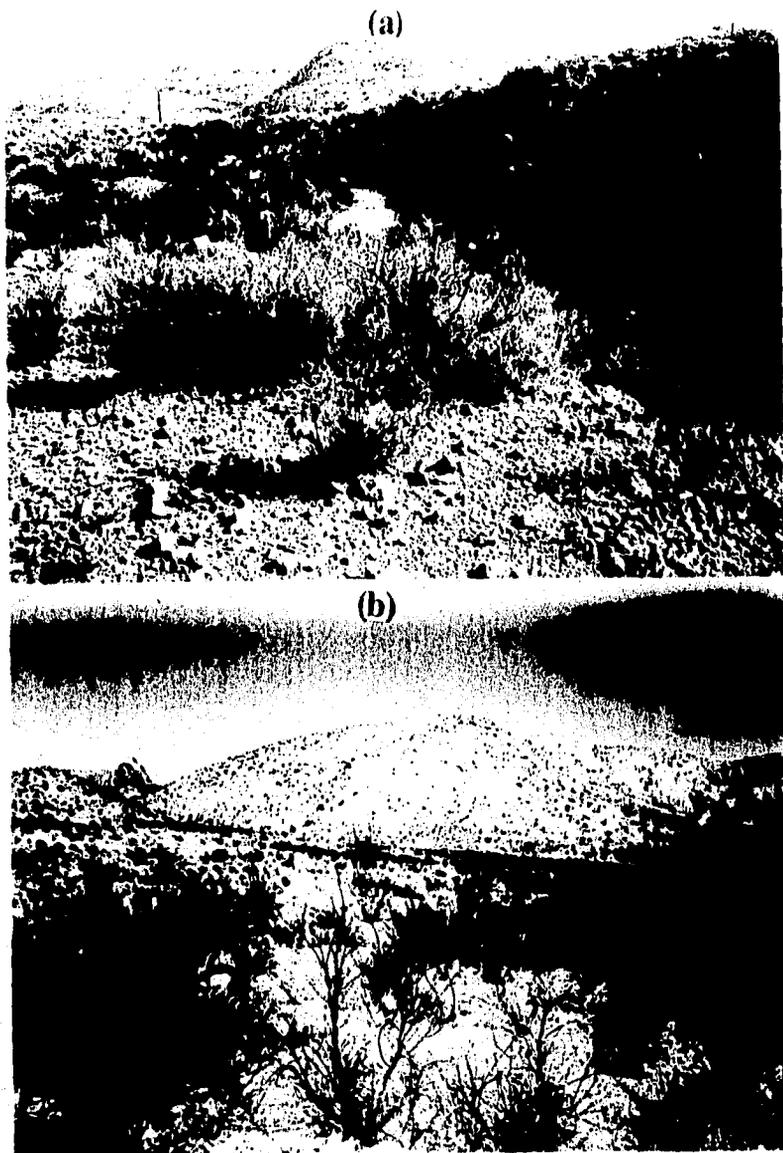


Figura 9. Por lo regular este tipo de matorral, presenta plantas leñosas como el mesquite (a), gobernadora (b) y lechuguilla, forman un estrato subarbustivo espinoso. Este sitio es adecuado para diferentes hábitats de varios insectos, aves, reptiles y mamíferos.

Existe una gran variedad de insectos, aves reptiles y mamíferos que habitan en esta región desértica de Chihuahua, de los cuales la ("rata canguro") *Dipodomys merriami*, ("camaleones") *Phrynosoma cornutum* y ("ratones") *Peromyscus spp.* se pueden considerar dentro de la fauna de la región como bioindicadores radioecológicos (34).

Los bioindicadores antes mencionados (flora y fauna), nos indicarán los cambios de concentración del radionúclido (Ra-226) en los alrededores de la zona, lo cual permitirá establecer el grado de migración del radionúclido. La ruta más probable de exposición hacia el hombre sería por la vía de infiltración hacia los acuíferos, aunque esta es muy improbable por su profundidad (34).

2.1.3 Clima.

Peña Blanca es una zona de minas de uranio, la información meteorológica fué proporcionada por el servicio Meteorológico y Geográfico del Estado de Chihuahua, estos estudios se han basado en los datos de las estaciones más cercanas que son las de "El Sauz" y "Villa Aldama" Figura 10.

El Sauz tiene una altitud de 1530 msnm., latitud 29°05' y longitud 106°15', los datos de precipitación, temperatura y evaporación son desde 1960 a 1993.

Precipitación pluvial promedio 415.1 mm/año

Año más seco 1964, con 180.8 mm.

Año más húmedo 1981, con 1128.5 mm

Temperatura (T) máxima extrema 40.0°C

Temperatura (T) mínima extrema -18.5°C

La velocidad y dirección de los vientos dominantes, así como la de insolación y humedad relativa no se tienen datos.

De acuerdo al sistema de clasificación mundial climática de Köppen, modificado por Enriqueta García para México, el clima de la cuenca "El Sauz" se define como **BWkw(e')**, (35, 38).

BW: Clima muy seco o desértico,

K: Clima templado con verano cálido, con temperatura media anual entre 12 y 18°C, la del mes más frío entre -3 y 18°C y la del mes más caliente mayor de 18°C.

w : Régimen de lluvias de verano.

e' : Muy extremoso, con oscilación térmica mayor de 14°C.



Figura 10. Peña Blanca es una zona de minas de Uranio. En la parte de arriba se observa algunos cortes de color rojizo y en la parte inferior una falla geológica de coloración pálida y rojiza, que son presencia de Uranio.

La estación de Villa Aldama presenta el mismo tipo de clima que el Sauz **BWkw(e')** (35, 38);

Precipitación pluvial promedio 334.4 mm/año

Año más seco 1957, con 87.6 mm.

Año más húmedo 1981, con 699.1 mm

Temperatura media anual: 19.2°C

Temperatura (T) máxima extrema 44.0°C

Temperatura (T) mínima extrema -14.0°C

Peña Blanca se encuentra en la parte alta de la Sierra de Peña Blanca a una altura de 350 m mayor que el Sauz, la vegetación es similar en los tres sitios, por lo cual se dice que en la zona minera de Peña Blanca el clima es también del tipo **BWkw(e')**. El drenaje es de tipo dendrítico, por lo que sus suelos presentan una resistencia uniforme a la erosión, además no existe ninguna corriente o cuerpos de agua superficial tales como ríos, lagos, pantanos o estuarios.

2.1.4 Geología.

Los sedimentos están constituidos principalmente por gravas, conglomerados, arenas arcillosas y tobas, intercalados de manera irregular, todos ellos cementados con caliche, sobretodo en los primeros dos metros superficiales (20, 29).

Geológicamente, la Sierra Peña Blanca se compone de dos ambientes litológicos bien definidos: uno sedimentario calcáreo y una secuencia volcánica de edad terciaria, (4). La secuencia de unidades litológicas se describe de acuerdo a su edad. Primero se describirán las rocas calcáreas cretácicas, las cuales se encuentran aflorando hacia el sur y poniente del área de estudio. Los afloramientos al poniente son reducidos. Las calizas forman el basamento irregular sobre las cuales se depositó la secuencia volcánica terciaria **Figura 11**.

Las calizas de la **Formación El Abra**, han sido correlacionadas con la caliza aurora por Tovar y Valencia, 1974 (39), y por Enos, 1974 (40). En 1970, Deford (41) y Stega 1979, (42). El estudio paleontológico realizado por Stega, (42), determinó que la formación El Abra en la Sierra de Peña Blanca pertenece al Albiano, es un conglomerado de fragmentos de caliza fuertemente silicificada, con calcita y eventualmente minerales secundarios de uranio relleno los espacios porosos.

La **Formación Pozos**, está constituida por un conglomerado calcáreo, cuyos fragmentos tienen dimensiones que oscilan entre los 0.5 y 15 cm, también tienen fragmentos de riolita y andesita. Se puede apreciar estructuras lenticulares y depósitos de canal de material tobáceo rojizo, que puede llegar a constituir el 25 % de la formación Pozos en algunas áreas.

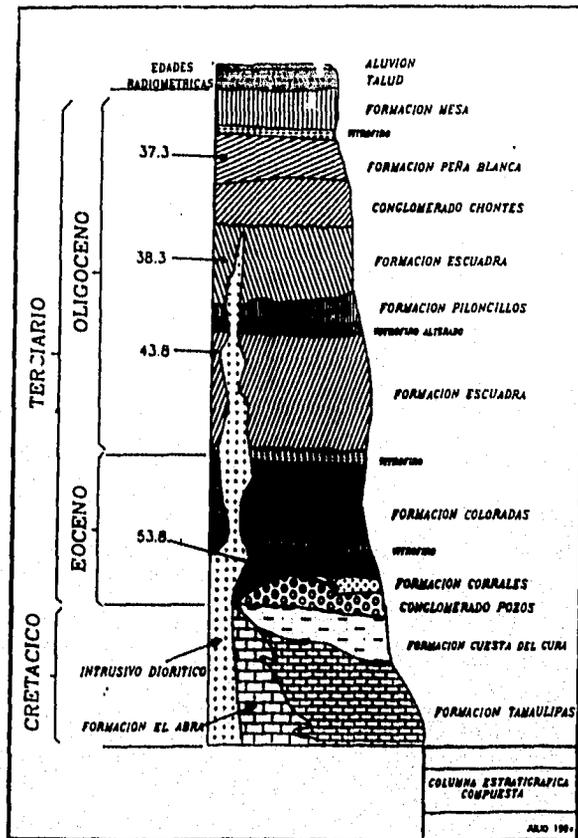


Figura 11. Columna estratigráfica compuesta. Se observa la litología y las edades radiométricas de los distintos sedimentos existentes en Peña Blanca Chihuahua, (20, 41).

La Formación Coloradas, sobreyace al conglomerado Pozos y subyace a la Formación Nopal, está formada por una ignimbrita (rocas ígneas sobrepuestas unas con otras) lítica y lítico-vítrea con fragmentos de pomez muy aplanados y su característico color rojizo, la edad de la formación colorada es mayor a 44 Millones de años (Ma.), presenta fenocristales en abundancia de 5 a 10 %, donde predomina la plagioclasa sódica.

La Formación Nopal, fechado en 44 Ma., la distribución espacial de la formación Nopal es muy extensa, ya que se encuentra desde la parte norte de la Sierra de Gómez, la Sierra del Gallego al norte del área (43) y en la misma Sierra de Peña Blanca al norte de Aldama, esta formación Nopal es una toba cristalolítica o cristalina de color rojo y rojo parduzco en las zonas soldadas. El contenido de fenocristales promedio varía de 25 a 30 %, donde la biotita es más abundante que la plagiocasa.

La Formación Escuadra se fechó en 38 Ma (44); está formada hacia la base por tobas y tobas retrabajadas por el agua, un grueso fajar y en la cima una ignimbrita bien definida cristalina de densa a ligeramente soldada con un vitrófido basal bien desarrollado; hacia la parte más superior está mucho menos soldada. La parte inferior volcániclastica fue denominada como;

Formación Piloncillos, cuyo espesor varía de 60 a 90 m. Las zonas tobáceas de la Formación Piloncillos son las que presentan la mineralización de uranio en el área de Margaritas, formada por una toba cristalolítica, conteniendo abundancia de fenocristales de andesita, riolita, biotita y pequeños cristales de cuarzo y sanidino.

La transición entre la Formación Escuadra y la Formación Peña Blanca es un material conglomerático, volcánico-clástico, intercalado con horizontes de 0.1 a 3 m. de espesor de toba intensamente argilitizada; a esta unidad litológica se le denominó **Formación Chontes**, que son de caliza y volcánicos, tiene una matriz arenosa, formados por granos de material volcánico principalmente. Las partes más gruesas contienen capas y lentes de arenisca y arenisca conglomerática al igual que algunos horizontes tobáceos intercalados con los conglomerados. La formación Chontes varía de 5 a 200 m. de espesor.

La Formación Peña Blanca consiste de una distintiva toba blanca, blanda y deleznable, se caracteriza por estar formada de tobas líticas. En base al intervalo de tiempo tan pequeño existente entre los fechamientos radiométricos de las formaciones Escuadra y la Mesa; la parte tobácea blanca superior de la formación Peña Blanca, puede representar la parte superior retrabajada y transportada de la porción no soldada de la formación Escuadra. La parte más resistente, parcialmente soldada como a 10 m. de la cima de la formación, puede haberse formado como resultado del calor, la presión y la actividad química durante el emplazamiento de la Formación La Mesa.

La Formación Mesa se ha fechado en 37.5 Ma. (44), es una arenisca volcánica, sobreyacida por un vitrófido de 5 m de espesor. La zona densamente soldada, inmediatamente encima del vitrófido, contiene abundantes fragmentos de pomez aplanados y alargados; la textura eutaxítica es predominante y distintiva de la unidad y llega a desarrollar estructuras de flujo en algunos lugares. La mayor parte de la Formación Mesa es una ignimbrita cristalina moderada a densamente soldada de color rojo oscuro a parduzco: el color pardo rojizo oscuro, junto con el bandeamiento eutaxítico bien desarrollado, distinguen a la Formación Mesa de las otras en el área. La parte superior de la unidad se encuentra erosionada en toda la región por lo que los espesores medidos son parciales.

La geología histórica del área incluye rocas tan antiguas que están constituidas por calizas de ambientes de plataforma y arrecifales de mares tranquilos y someros donde la fauna floreció en abundancia. Esto permitió la acumulación de grandes depósitos de este tipo de roca. Hacia finales del Cretácico, se inició una actividad tectónica que interrumpió la acumulación de rocas calcáreas marinas, para dar paso a la acumulación de conglomerados continentales.

La exploración geofísica que se realizó en el sitio de depósito de jales y sus alrededores tuvo como fin determinar el espesor del aluvión que sobreyace a la Formación Chontes, cuya resistividad se conoció mediante un sondeo de calibración, el número 9, efectuado en un punto cercano al afloramiento de dicha formación (ver mapa de localización Figura 12). Adicionalmente, se realizó un sondeo con abertura mayor entre electrodos para tratar de medir el espesor de la propia Formación Chontes en el sitio.

Estos datos serán de importancia para estimar los tiempos de tránsito de los posibles contaminantes generados por el jal depositado.

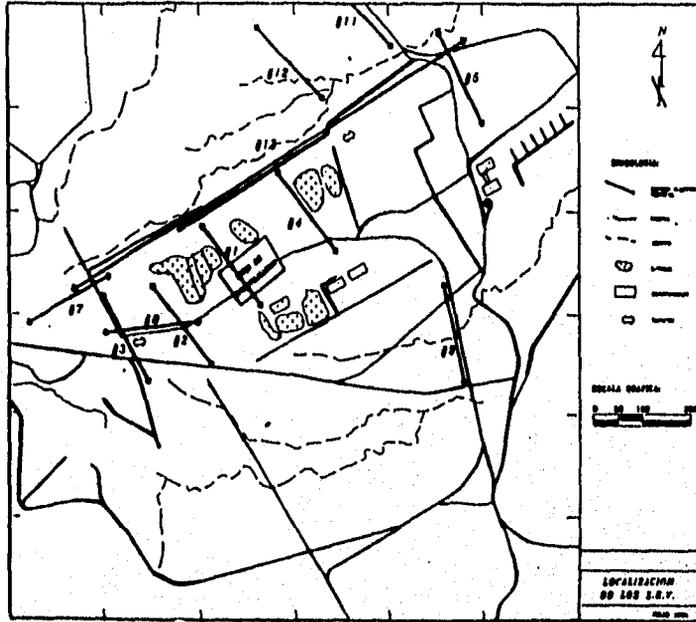


Figura 12. Plano de ubicación de los Sondeos Electricos Verticales (SEV), para la exploración geofísica del sitio y saber así el espesor del aluvión que subyace a la formación chontes.

CAPITULO III

JUSTIFICACION

Se sabe que la depredación de la flora o fauna, la construcción de caminos y carreteras etc. ocasiona transformaciones, en las áreas circundantes, y en ocasiones son tan grandes que influyen decisivamente en los aspectos físicos, químicos y biológicos, y en las condiciones de vida de los hombres que habitan el ecosistema. Con frecuencia el impacto ambiental ha sido irreversible y severo.

La selección de un sitio para la instalación de un depósito de jales de uranio, implica el análisis de las características físicas, químicas, biológicas, sociales, económicas, culturales y gubernamentales del mismo. Cada característica, por otra parte, debe ser evaluada, no sólo en relación con el impacto generado por la fuente, sino determinando el patrón de respuesta o el efecto subsecuente de la instalación.

Los estériles o jales de uranio deben estar contenidos de modo que permanezcan aislados del medio ambiente por un periodo de tiempo tan largo como lo permita la mejor tecnología disponible. Los estériles deben ser dispuestos de tal manera que no se requiera mantenimiento activo para preservar la eficacia de la contención.

Los radionúcleidos más importantes que puedan contaminar al medio ambiente y al hombre, son los que están contenidos en **Jales de uranio**, principalmente el radio-226 y sus descendientes. El Ra-226 es un isótopo de vida media larga y todos sus isótopos son radiactivos, motivo por el que se estudia la migración de éste radionúcleido.

Sin embargo, la actividad volcánica y sísmica debe ser baja, con el fin de evitar fracturamientos en las capas geológicas subyacentes al depósito, deslices de tierra y exposición de los jales, toda la zona norte del país cumple este criterio.

En cuanto a las condiciones hidrológicas el sitio no debe presentar corrientes superficiales de agua porque pueden erosionar la cubierta protectora, y el intemperismo debe minimizarse con una cubierta de plantas típicas de la zona donde se encuentra el depósito.

CAPITULO IV

HIPOTESIS DE TRABAJO Y OBJETIVOS

HIPOTESIS

Dadas las características del terreno donde se depositan los jales, las condiciones radiológicas de los jales y considerando que en el futuro puede haber un riesgo potencial de contaminación por Ra-226 emitido al ambiente; se puede cuantificar el tiempo de migración del Ra-226 en tres diferentes capas del subsuelo en la zona de Peña Blanca hasta llegar a aguas superficiales y de esta manera afirmar que el riesgo radiológico que se puede producir es prácticamente similar al fondo natural.

OBJETIVO GENERAL

Dar un método alternativo y económico para el cálculo de tiempos de migración de radionúcleidos en estratos subterráneos o donde haya riesgos de un impacto radiológico a la población, por medio de la posible incorporación de agua o alimentos contaminados radiológicamente.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Calcular por métodos geofísicos (Eléctricos) el espesor de las capas del suelo a profundidades someras.
- Determinar el mejor sitio para el depósito de jales.
- Determinar las mejores condiciones de protección radiológica en el traslado de los esteriles o jales.
- Obtener la distancia en los estratos geológicos subyacentes al sitio de depósito que recorre el Ra-226 al cabo de 1 año
- Determinar, que tanto puede afectar la migración del Ra-226 al ecosistema en el transcurso de unos 100 años.

CAPITULO V

METODO

5.1 Estudio de la zona

Para el estudio de la zona, se usaron fotografías aéreas a color a una escala aproximada de 1:18 000., además se realizó un plano fotogeológico preliminar de la zona y estereoscopio de espejos, que sirvió de base para el reconocimiento y verificación de las estructuras y la estratigrafía. El plano geológico del área de estudio fué levantado con poligonales abiertas utilizando plancheta y alidada durante los meses de mayo y junio de 1994. Los planos topográficos empleados fueron los proporcionados por el Consejo de Recursos Minerales (CRM) a escala de 1 : 2 000. (45).

Se diseñó y construyó una instalación para alojar y contener 45 000 toneladas métricas de estériles o jales (residuos radioquímicos) de uranio que se produjeron durante la operación de una planta de producción de concentrados de uranio y molibdeno entre 1969 y 1971. La instalación tiene el objetivo de aislar los estériles de uranio, (Ra-226 y sus descendientes), ya que solo contienen trazas de uranio y torio (4, 21)

Se decidió trasladar los jales a la zona de minas de uranio ubicado en la Sierra de Peña Blanca, a 47 Km al norte de la población de Aldama.

5.2 Selección del sitio de depósito de estériles

Para seleccionar el sitio de depósito de los estériles de uranio y para establecer las especificaciones técnicas del apilamiento se siguieron los siguientes criterios:

Los estériles o jales de uranio deben estar contenidos de modo que permanezcan aislados del medio ambiente por un periodo de tiempo tan largo como lo permita la mejor tecnología disponible. Los estériles deben ser dispuestos de tal manera que no se requiera mantenimiento activo para preservar la eficacia de la contención (21, 46).

La actividad económica en el sitio debe ser mínima en un tiempo previsible; el sitio, debe ser seco, tanto por precipitación pluvial como por acumulación de agua en mantos freáticos, ya que el agua es un medio de transporte de los radioisótopos al medio ambiente mediante cadenas tróficas, terminando en el humano.

El sitio debe encontrarse lejos de los centros de población existentes, en una zona de baja densidad demográfica y a una distancia razonable de la planta de beneficio para que permita el traslado de los jales a un costo bajo.

Es conveniente colocar los jales en una mina o cerca de un yacimiento de uranio, debido, a que de esta manera el impacto ambiental que se pudiera causar por los jales sería mínimo o nulo, estando por encima del fondo natural.

Los niveles freáticos deben de estar a una profundidad mayor o igual a 70 m., para que no se puedan contaminar mínimamente por los radionúcleidos contenidos en los jales. El sitio debe ser tan natural que no se requiera de demasiada obra de ingeniería en su preparación (37).

La pendiente natural del terreno que se seleccionó es de 7% de inclinación en la dirección E-W y de 5% en la dirección N-S, por lo que se prepararon dos terrazas para reducir la pendiente a un valor entre 0.5 y 2%. El terreno donde se acomodaron los estériles ocupó una superficie aproximada de 100 X 100 m². A lo largo de la trayectoria N-S se formó una doble pendiente en la forma de una V asimétrica, para que formara un canal para captar y conducir al exterior de la pila cualquier agua que lograra infiltrarse, una vez afinado el terreno se procedió a humedecerlo y compactarlo hasta un 90%.

Sobre el terreno preparado se colocó una cama de arcilla compactada con un espesor total de 30 cm., la conductividad hidráulica de la arcilla compactada, determinada en el laboratorio, es de 7.4E-08 cm/s. (37). Los estériles de uranio se trasladaron desde la planta de beneficio de Ciudad Aldama hasta el sitio seleccionado en la Sierra de Peña Blanca de acuerdo con lo establecido en el procedimiento P.DR.16. (34).

Los estériles se colocan sobre la cama de arcilla de manera que se formó una pirámide truncada de 100 X 100 y luego se compactan al 90%, posteriormente se protege contra la lluvia, la erosión y la posible intrusión de animales pequeños mediante una cubierta de dos capas. La primera capa, fué de la misma arcilla usada en la cama inferior y de un espesor similar; la segunda capa consistió de material aluvial de 40 cm de espesor, adecuado para impedir la intrusión de animales pequeños. Esta última capa se estabilizó contra la erosión plantando en su superficie especies vegetales de raíces cortas propias de la región. La capa superior tiene pendientes adecuadas para propiciar el escurrimiento del agua, evitando que se encharque.

Se hizo una prueba de lixiviación de los jales con agua natural (agua de la llave) a 60°C durante 50 horas, la prueba se hizo con una pulpa con relación sólido líquido de 1:1, manteniendo la pulpa en suspensión total durante la prueba, el líquido resultante (una vez filtrado) contenía 2 Bq/l de actividad alfa. Los jales son material fino que el 50% de ellos pasa la malla 200, su mismo grado de finura permite compactarlo bien, y el jal compactado a 95% tiene una conductividad hidráulica de $7.2E-06$ cm/s. (37).

Se instalaron tres sismógrafos analógicos de registro continuo en 3 puntos a una distancia aproximada de 1.5 Km del sitio de almacenamiento de los jales. En cada estación se colocó una grabadora analógica y un sismómetro con período natural de un segundo, cada estación se instala sobre afloraciones de rocas cretácicas lo que permite tener ganancias de 78 decibeles (db.).

Durante un registro efectivo de 39 días a partir del 16 de Abril de 1994, no se registró ningún sismo local en el área de interés. Sin embargo se registraron 7 sismos a distancias que oscilan entre 30 y 60 Km del sitio con magnitudes entre 2.4 y 3.4 grados Richter (26), los cuales se localizaron en las fallas normales de la Sierra de Matanza y Nueva Delicias.

5.3 Transporte de los Estériles y Protección Personal

En el transporte de los estériles de uranio, se debe cuidar que los vehículos no derramen material por la parte trasera de la caja de volteo y la parte superior de la caja. Esto se logra, poniendo cámaras de llantas en la puerta trasera de la caja, para sellarlas durante el transporte y poniendo una lona en la parte superior; antes de salir de la planta de Aldama, los vehículos pasarán por un punto de control radiológico, en el que se descontaminaran los vehículos de los lados de la caja de volteo y en las llantas. Esto se logra limpiando con agua dichas partes del camión, y supervisando que el operador de la unidad coloque la lona y la moje para su traslado, para evitar derramamiento de la tierra.

A la salida de la planta, los camiones pasan por la báscula, donde se les extiende una hoja de control con la carga que llevaban. También se hace una verificación radiológica de los niveles de radiación, encontrándose típicamente en cabina (0.1 mR/h), a contacto con la caja (0.5 mR/h) y a un metro de la caja (0.2 mR/h).

Se hizo una prueba de lixiviación de los jales con agua natural (agua de la llave) a 60°C durante 50 horas, la prueba se hizo con una pulpa con relación sólido líquido de 1:1, manteniendo la pulpa en suspensión total durante la prueba, el líquido resultante (una vez filtrado) contenía 2 Bq/l de actividad alfa. Los jales son material fino que el 50% de ellos pasa la malla 200, su mismo grado de finura permite compactarlo bien, y el jal compactado a 95% tiene una conductividad hidráulica de $7.2E-06$ cm/s. (37).

Se instalaron tres sismógrafos analógicos de registro continuo en 3 puntos a una distancia aproximada de 1.5 Km del sitio de almacenamiento de los jales. En cada estación se colocó una grabadora analógica y un sismómetro con período natural de un segundo, cada estación se instala sobre afloraciones de rocas cretácicas lo que permite tener ganancias de 78 decibeles (db.).

Durante un registro efectivo de 39 días a partir del 16 de Abril de 1994, no se registró ningún sismo local en el área de interés. Sin embargo se registraron 7 sismos a distancias que oscilan entre 30 y 60 Km del sitio con magnitudes entre 2.4 y 3.4 grados Richter (26), los cuales se localizaron en las fallas normales de la Sierra de Matanza y Nueva Delicias.

5.3 Transporte de los Estériles y Protección Personal

En el transporte de los estériles de uranio, se debe cuidar que los vehículos no derramen material por la parte trasera de la caja de volteo y la parte superior de la caja. Esto se logra, poniendo cámaras de llantas en la puerta trasera de la caja, para sellarlas durante el transporte y poniendo una lona en la parte superior; antes de salir de la planta de Aldama, los vehículos pasarán por un punto de control radiológico, en el que se descontaminaran los vehículos de los lados de la caja de volteo y en las llantas. Esto se logra limpiando con agua dichas partes del camión, y supervisando que el operador de la unidad coloque la lona y la moje para su traslado, para evitar derramamiento de la tierra.

A la salida de la planta, los camiones pasan por la báscula, donde se les extiende una hoja de control con la carga que llevaban. También se hace una verificación radiológica de los niveles de radiación, encontrándose típicamente en cabina (0.1 mR/h), a contacto con la caja (0.5 mR/h) y a un metro de la caja (0.2 mR/h).

Los vehículos que se excedan la capacidad de la báscula son pesados en otro sitio, donde se taran y se pesen por una sola ocasión, esto se tomaba como referencia para las siguientes cargas.

Se tiene especial cuidado en que todos los trabajadores tengan que portar un sobretodo, zapatos de trabajo, guantes de hule o carnaza, cubreboca y escafandra, cuando se manipula o transporta el material, con el objeto de evitar incorporación o contaminación del material. A ningún trabajador se le permite trabajar sin estas medidas de protección, así como el lavarse las manos antes de cada comida y bañarse después de cada jornada de diario trabajo.

El sitio de depósito se cerca en una área aproximadamente de 20 ha., con objeto de impedir el acceso de personas no autorizadas y de animales grandes ya sea silvestres o domésticos. Además la zona está señalizada con letreros indicando la presencia de material radiactivo y prohibiendo el acceso.

5.4 Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)

El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) es una técnica ampliamente utilizada para la investigación del subsuelo a profundidades moderadas. El principio que se menciona en el punto 1.3.2, consiste en inyectar una corriente eléctrica al terreno por medio de barras de acero parcialmente enterradas y detectar la diferencia de potencial producida entre otros dos electrodos convenientemente **Figura 3 y 4.**

Con esto se logra medir la resistividad eléctrica de una porción de subsuelo cuya profundidad depende de la separación entre los electrodos de corriente. Al separar estos electrodos se obtiene un valor de resistividad que es afectado por capas cada vez más profundas del terreno y al que se denomina resistividad aparente.

Para la ejecución del SEV se toma un punto del terreno como estación, se procede a realizar una serie de lecturas con distintos valores de corrientes y separación de electrodos tomando en cuenta los parámetros del equipo. A medida que la distancia de los electrodos aumenta la información que recibimos corresponde a profundidades mayores (47, 49).

CAPITULO VI

RESULTADOS

Con la ayuda de las diversas disciplinas se seleccionó el sitio adecuado, ya que presentó todas las características necesarias para el apilamiento de los estériles, con fecha 5 de Noviembre de 1994, se terminó de trasladar a la Sierra de Peña Blanca los estériles y las limpias del terreno, dando una cantidad total de 47,113.093 Ton. transportadas, durante 17 semanas de trabajo.

Resultados de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).

Por lo que, respecta al problema de interpretación de los sondeos eléctricos verticales se pueden resolver por medio de curvas patrón que se obtienen de un modelo físico simplificado, donde se hacen una serie de suposiciones como son: terreno horizontal, contactos entre distintas capas de espesor infinito. En este trabajo se utilizó de manera primordial los programas de cómputo desarrollados por Orellana y Mooney, 1966, (48), que simplifican el trabajo y su precisión es adecuada, en algunos casos se comparan con las curvas que existen en la bibliografía; los resultados fueron equivalentes (Obtención de curvas patrón por medio de computadora), E. Orellana, 1966, (49).

Bajo el supuesto de que el subsuelo está formado por capas homogéneas y paralelas a la superficie, es posible encontrar una relación matemática entre las resistividades y los espesores de las capas que conforman el terreno y la resistividad aparente del conjunto, que es la que se mide en superficie.

Un SEV consistió en medir la resistividad aparente para una serie de aberturas entre electrodos de corriente. La curva así obtenida se invierte matemáticamente, con ayuda de una computadora, para calcular las resistividades y espesores reales de las capas que dieron lugar a los valores medidos.

La primera parte de la exploración se centró en el sitio de depósito y sus alrededores, en el plano de la **Figura 12** se muestra la ubicación de 11 sondeos cuyo número corresponden al orden cronológico en que fueron realizados (no se tomaron en cuenta los sondeos 6 y 10, por estar en una estructura geológica distinta).

Con el fin de precisar el cálculo de los espesores de las capas de aluvión que se encuentran por encima de la Formación Chontes en el talud donde se depositarán los jales, se efectuó un sondeo de calibración, el número 9 (no fue registrado), cerca de un afloramiento de esta formación para conocer su resistividad, que es de 22 ohm-m aproximadamente, valor que fue tomado en cuenta para la interpretación de todos los sondeos.

En la **Figura 13** se muestra la sección geoelectrica que se construyó con los resultados de los SEVs 7,3,8,2,1 y 4, se distinguen 4 capas, la más superficial de las cuales presenta una alta resistividad (500 a 1300 ohm-m) y un espesor promedio de 2.5 m; corresponde a suelo completamente seco y una capa de caliche. La siguiente capa es arena conglomerática con resistividades de 120 a 190 ohm-m y espesores de 4 a 5 m.; la tercera con una resistividad mayor de entre 400 y 480 ohm-m es un conglomerado de granulometría gruesa. Estas tres capas corresponden a material de acarreo y presentan grado nulo de saturación.

En la **Figura 14** contiene a los SEVs 1,4,5 y 10, como se aprecia en esa sección, el punto del SEV 10 la Formación Chontes no aparece, por lo menos hasta una profundidad de 50 m., el SEV #6 no se incluyó en esta sección por que está en una estructura geológica distinta, es decir, del otro lado de una falla interpretada perpendicular a la que se dibuja en esta sección, lo cual se confirma con la presencia de la última capa de este sondeo, cuya resistividad corresponde a la Formación Chontes.

Los SEVs 11 y 12 tuvieron el propósito de contrastar la profundidad a la que se ubica la Formación Chontes en ese talud con la que se aparece en la **Figura 12**, que ya se describió, pues se presume que existe una falla a lo largo del arroyo que separa los dos taludes. La diferencia en profundidades no es, sin embargo, muy notable.

La interpretación del SEV 13 es difícil por que hay demasiadas variaciones laterales de resistividad. Sin embargo, es posible afirmar que la Formación Chontes tiene un espesor mayor a los 100 m en el punto del SEV #13, finalmente las curvas de SEVs (**Figuras 15 a la 27**) y la **Tabla A** contienen los resultados de la interpretación aplicada a cada sondeo.

Debemos ahora conocer el tiempo en que los radionúcleidos (especialmente el Ra-226) migra del sitio de depósito de jales hasta la cuenca de la laguna del cuervo. Tomemos en cuenta a la unidad litológica que subyace al material de talud, que es la base del sitio de depósito y que es un sello natural por su grado de alteración a arcillas y su gran espesor que impedirán el flujo descendente (Formación Chontes). Se consideró para los cálculos que el flujo descendente es detenido por la formación Chontes y obligado a fluir por la pendiente hacia el oriente y se encauza como flujo superficial en la Boquilla Colorada, ya que en éste caso el espesor del aluvión es muy pequeño.

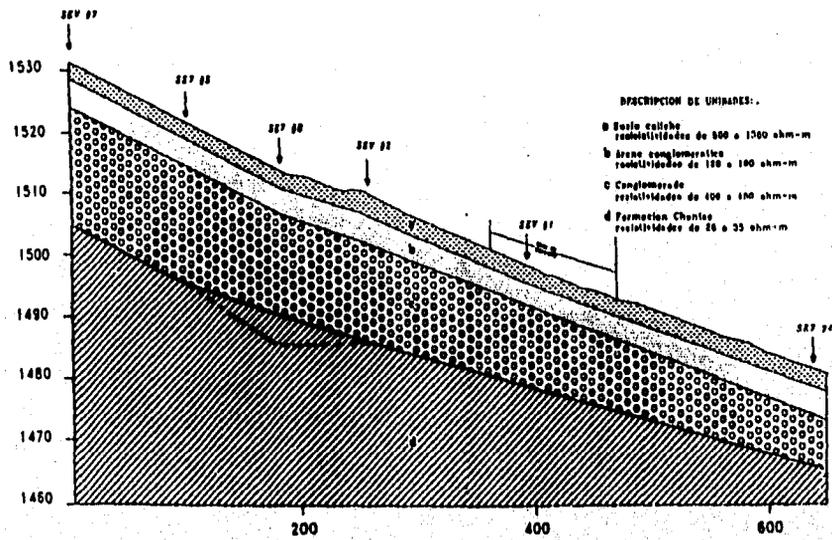


Figura 13. Sección geoelectrica construida para los SEV 7, 3, 8, 2, 1 y 4, corte con cierto ángulo de inclinación y cuatro capas subyacentes.

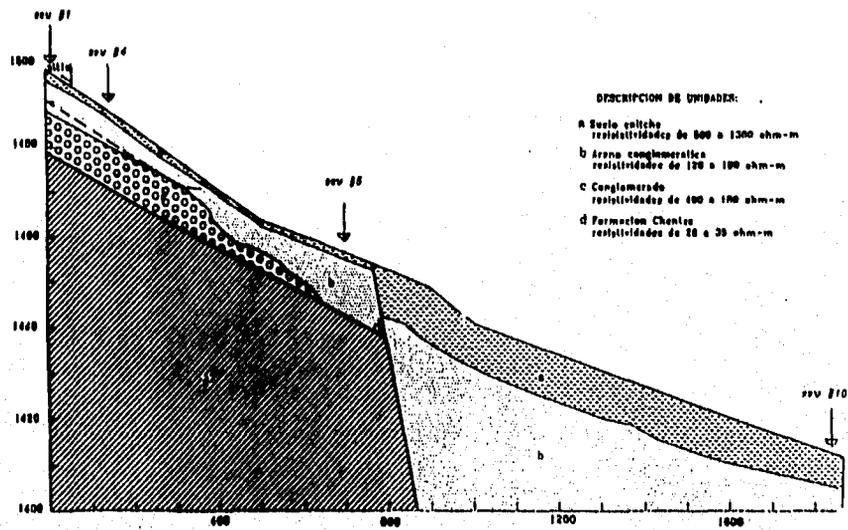


Figura 14. Sección geoelectrica construida para los SEV 1, 4, 5 y 10, corte con cierto ángulo de inclinación y la distribución de las capas subyacentes.

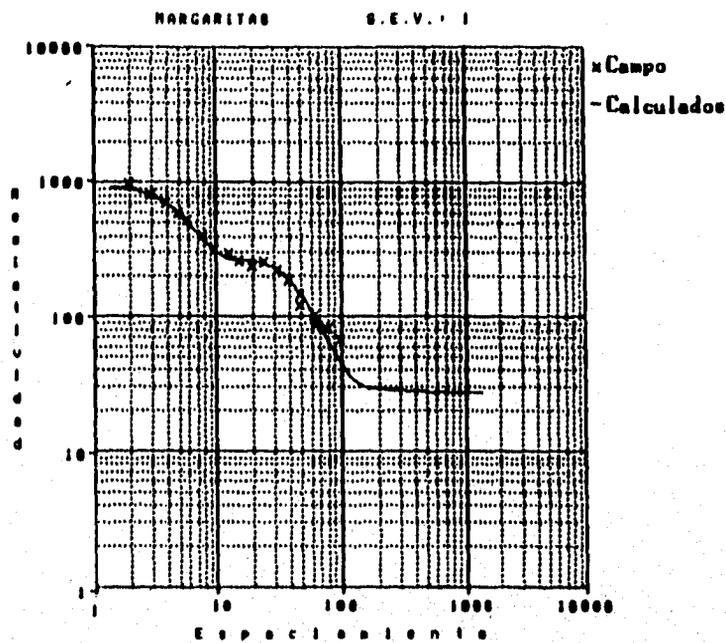


Figura 15. Curva de resistividad del SEV #1. Datos obtenidos en campo (experimental) en relación con la ec. 20 y las figuras 3 y 4.

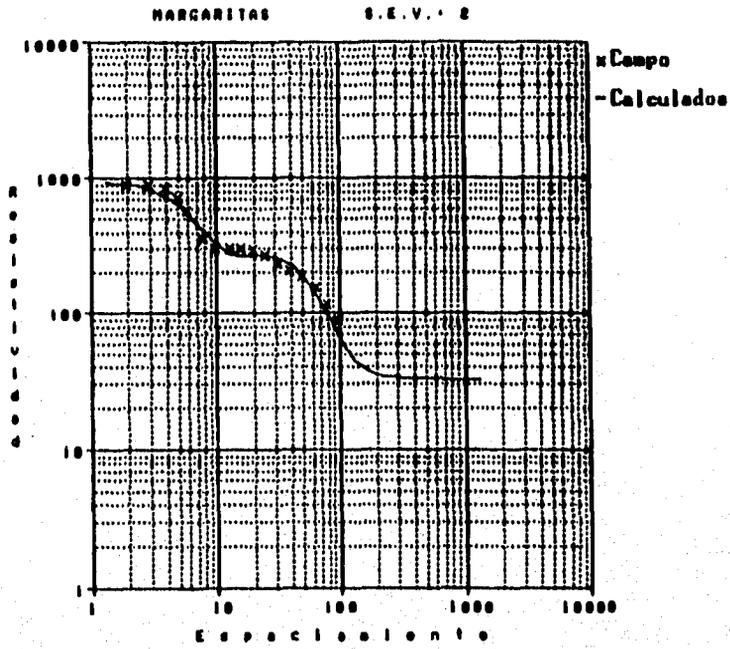


Figura 16. Curva de resistividad del SEV #2. Datos obtenidos en campo (experimental) en relación con la ec. 20 y las figuras 3 y 4.

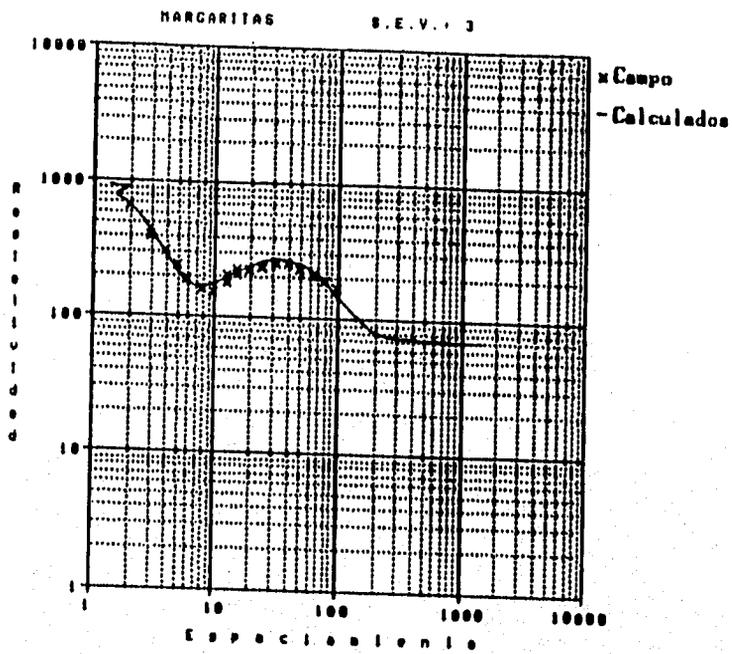


Figura 17. Curva de resistividad del SEV #3. Datos obtenidos en campo (experimental) en relación con la ec. 20 y las figuras 3 y 4.

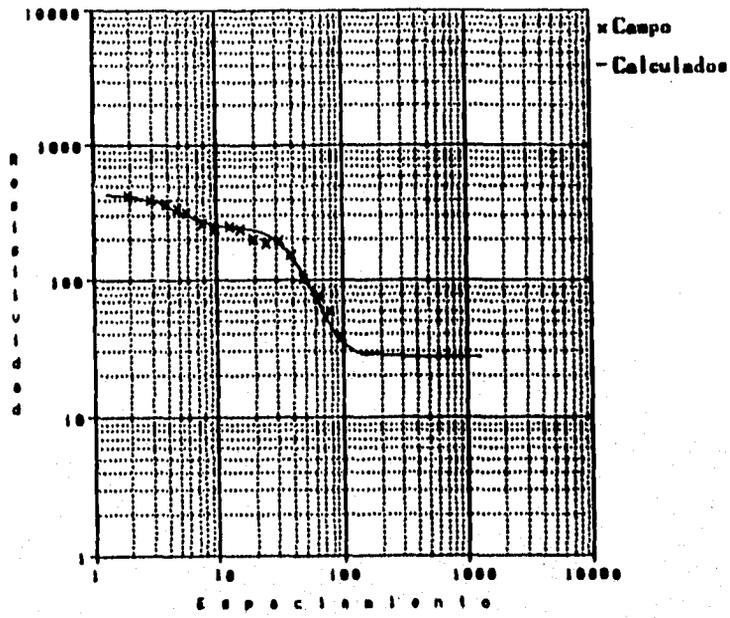


Figura 18. Curva de resistividad del SEV #4. Datos obtenidos en campo (experimental) en relación con la ec. 20 y las figuras 3 y 4.

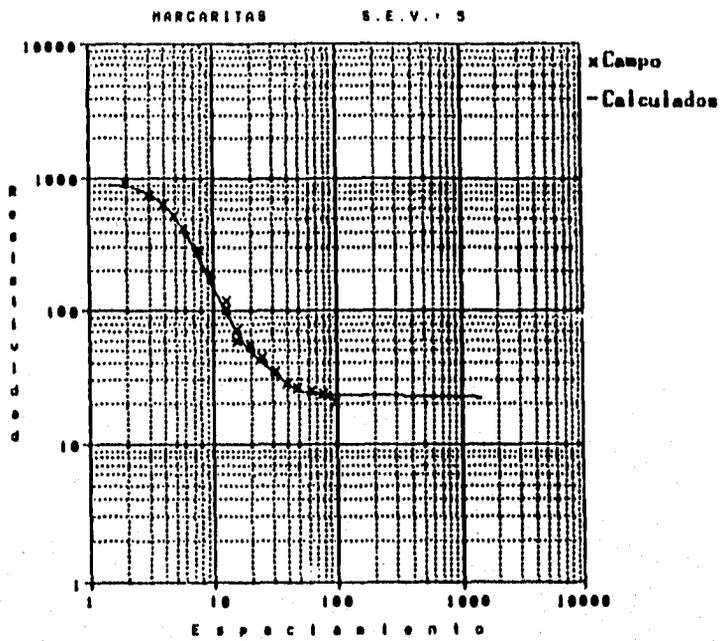


Figura 19. Curva de resistividad del SEV #5. Datos obtenidos en campo (experimental) en relación con la ec. 20 y las figuras 3 y 4.

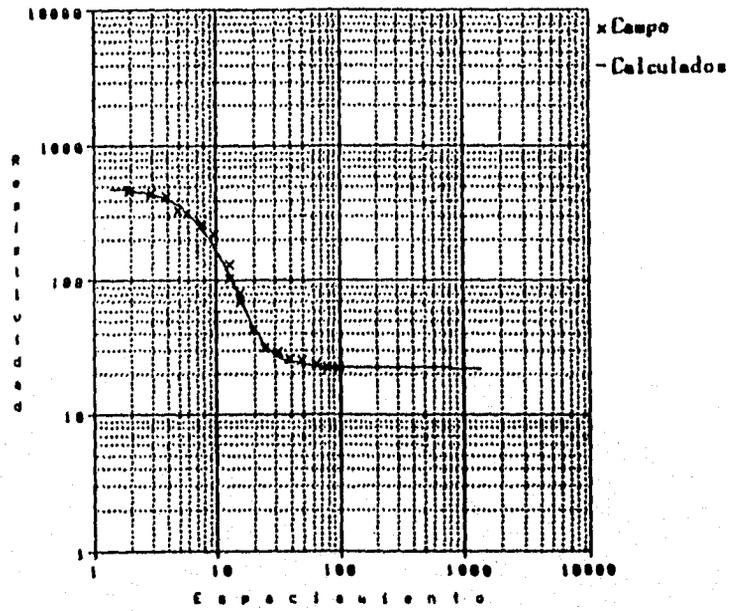


Figura 20. Curva de resistividad del SEV #6. Datos obtenidos en campo (experimental) en relación con la ec. 20 y las figuras 3 y 4.

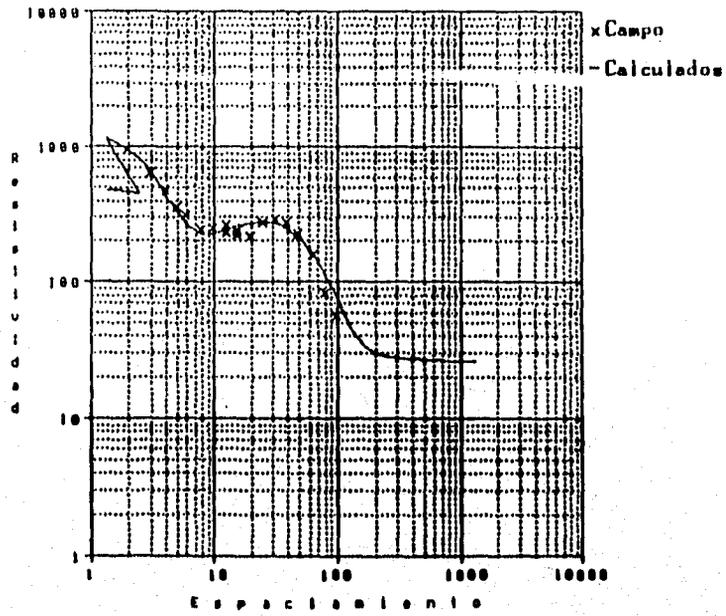


Figura 21. Curva de resistividad del SEV #7. Datos obtenidos en campo (experimental) en relación con la ec. 20 y las figuras 3 y 4.

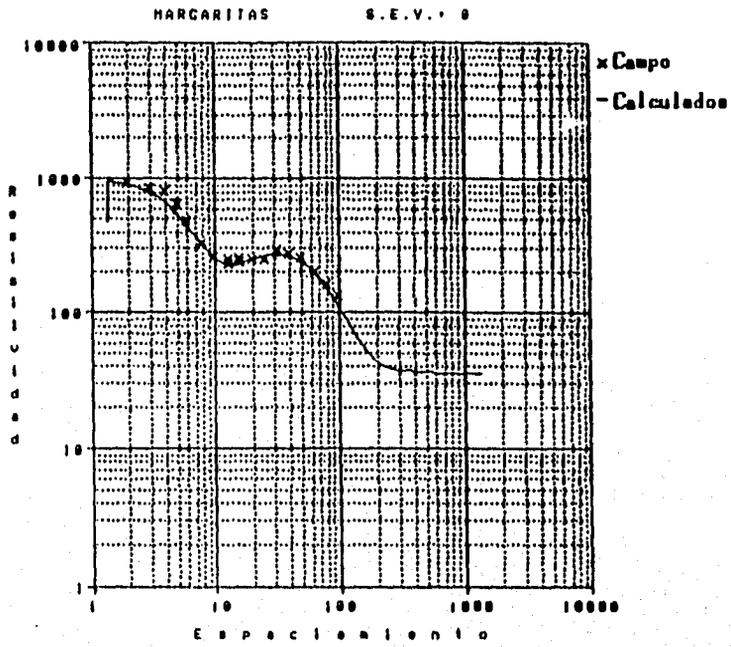


Figura 22. Curva de resistividad del SEV #8. Datos obtenidos en campo (experimental) en relación con la ec. 20 y las figuras 3 y 4.

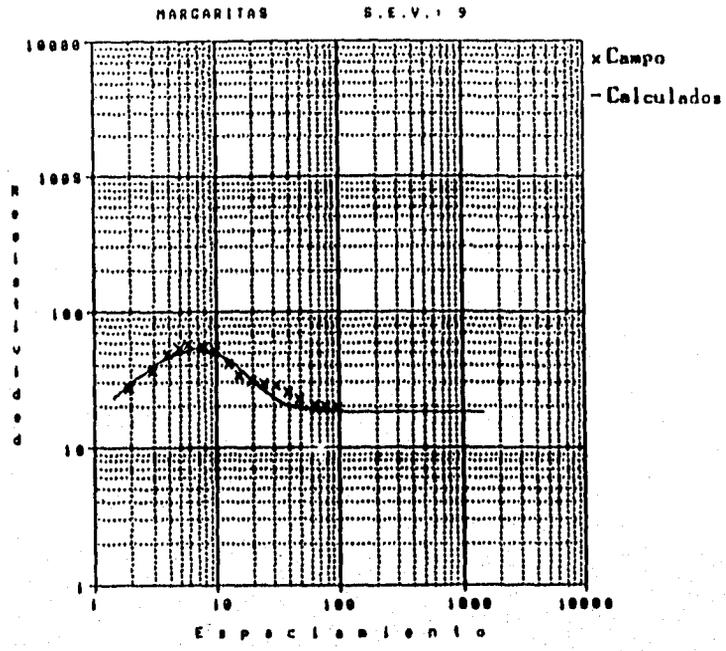


Figura 23. Curva de resistividad del SEV #9. Datos obtenidos en campo (experimental) en relación con la ec. 20 y las figuras 3 y 4.

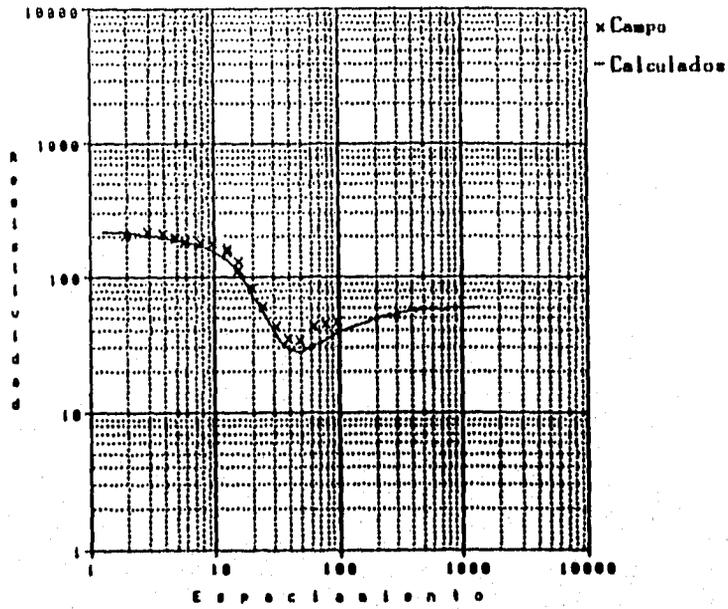


Figura 24. Curva de resistividad del SEV #10. Datos obtenidos en campo (experimental) en relación con la ec. 20 y las figuras 3 y 4.

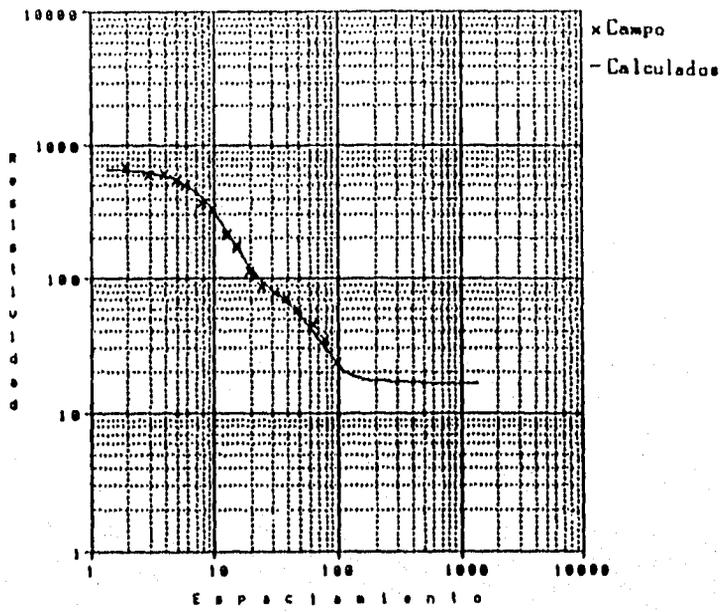


Figura 25. Curva de resistividad del SEV #11. Datos obtenidos en campo (experimental) en relación con la ec. 20 y las figuras 3 y 4.

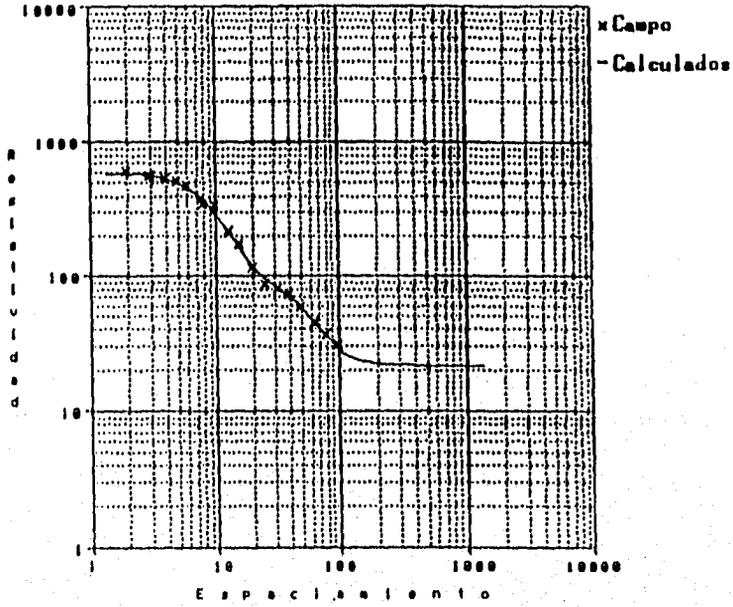


Figura 26. Curva de resistividad del SEV #12. Datos obtenidos en campo (experimental) en relación con la ec. 20 y las figuras 3 y 4.

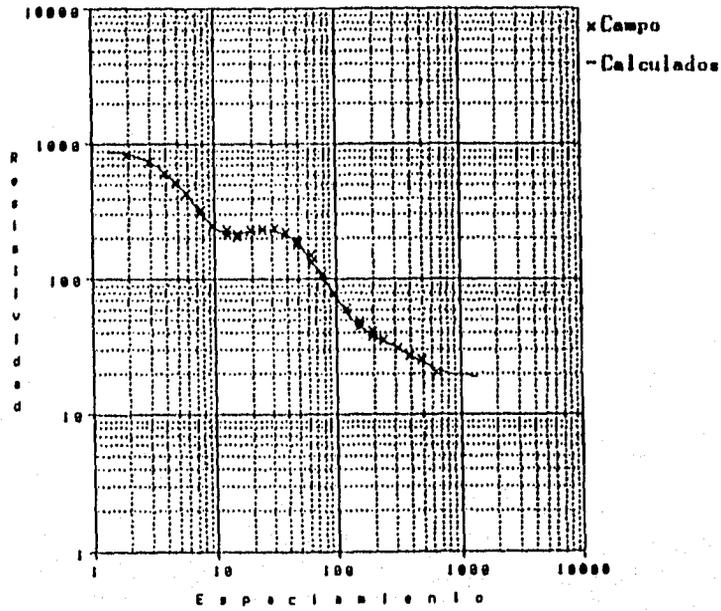


Figura 27. Curva de resistividad del SEV #13. Datos obtenidos en campo (experimental) en relación con la ec. 20 y las figuras 3 y 4.

TABLA A; * Sondeos Eléctricos Verticales SEV. Valores obtenidos de resistividad por la ec. 20, y el espesor de las capas, obtenidas por tablas, (49).

CAPA No.	RESISTIVIDAD (ohm-m)	ESPESOR (m)	PROFUNDIDAD (m)
*SEV #1			
1	950	2.6	2.6
2	180	4.8	7.4
3	400	13.0	20.4
4	27	---	---
*SEV #2			
1	950	3.0	3.0
2	150	4.2	7.2
3	400	17.0	24.2
4	32	---	---
*SEV #3			
1	150	1.3	1.3
2	120	5.2	6.5
3	480	19.0	25.5
4	50	---	---
*SEV #4			
1	440	2.4	2.4
2	190	5.0	7.4
3	450	8.3	15.7
4	27	---	---
*SEV #5			
1	930	2.7	2.7
2	75	8.0	10.7
3	22	---	--
*SEV #7			
1	1300	1.4	1.4
2	170	5.0	6.4
3	400	20.0	26.4
4	26	---	---

TABLA A; * Sondeos Electricos Verticales SEV. Valores obtenidos de resistividad por la ec. 20, y el espesor de las capas, obtenidas por tablas, (49).

CAPA No. *SEV #8	RESISTIVIDAD (ohm-m)	ESPESOR (m)	PROFUNDIDAD (m)
1	1000	2.5	2.5
2	130	4.8	7.3
3	420	22.0	29.3
4	35	---	---
*SEV #11			
1	650	4.5	4.5
2	90	23.0	27.5
3	16	---	---
*SEV #12			
1	590	4.5	4.5
2	85	23.0	27.5
3	21	---	---

Suponiendo que la velocidad de flujo del agua es directamente proporcional al gradiente hidráulico, la velocidad de descarga vendrá dada por:

$$v_d = kh = k \left(\frac{h_2 - h_1}{L} \right) \dots \dots \dots (21)$$

donde L es el desplazamiento, h gradiente hidráulico con, $h_2 - h_1$, es la altura piezométrica y k es el coeficiente de permeabilidad. Esta ecuación es aplicable a estratos con partículas no muy gruesas.

El coeficiente de permeabilidad en términos simples, es la velocidad del agua a través del sustrato, cuando está sujeto a un gradiente hidráulico unitario.

Sin embargo necesitamos la velocidad de filtración (v_f) que toma en cuenta la existencia de una fase sólida impermeable y que es la velocidad media de avance del agua en la dirección del flujo.

Con esta velocidad de filtración, la velocidad real del agua en el medio (v_w) se puede encontrar de la siguiente manera;

$$v_w = v_f \frac{L_m}{L} = \left(\frac{1+e}{e} \right) \frac{L_m}{L} v_d \dots \dots \dots (22)$$

- v_w : velocidad real del agua
- v_f : velocidad de filtración
- L_m : longitud real de la trayectoria
- L: longitud teórica de la trayectoria
- e: índice de poros (relación de vacíos)
- v_d : velocidad de descarga.

Conocido el valor de v_r , podemos calcular fácilmente el valor de v_d , contando obviamente con los datos (k_d , ρ y φ) que nos pide la ecuación 15.

Tomando como referencia las secciones geoelectrica **Figuras 13 y 14**, donde los estratos a considerar son el, a(suelo caliche), b(arena conglomerática) y c(conglomerado) se obtuvieron los siguientes resultados para la velocidad de descarga;

ESTRATO	MATERIAL	GRADIENTE HIDRAULICO * (h)	COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD k(cm ³)	VEL. DE DESCARGA V _d (cm/s)
a	caliche	0.07	10 ⁻⁵	7X10 ⁻⁷
		0.07	10 ⁻⁷	7X10 ⁻⁹
b	arena conglomerática	0.07	10 ⁻⁴	7X10 ⁻⁶
		0.07	10 ⁻⁵	7X10 ⁻⁷
c	conglomerado	0.07	10 ⁻³	7X10 ⁻⁵
		0.07	10 ⁻⁵	7X10 ⁻⁷

* Calculado de las secciones geoelectricas

Con estos valores obtenemos las velocidades reales del agua en el sustrato.

ESTRATO	MATERIAL	REL. DE VACIOS (e) *	VELOCIDAD DE DESCARGA (V _d)**	Lm/L **	VEL. REAL V _w (cm/s)
a	caliche	1.0	7X10 ⁻⁷	10	1.4X10 ⁻⁶
		1.0	7X10 ⁻⁹	10	1.4X10 ⁻⁷
b	arena conglomerática	0.7	7X10 ⁻⁷	1,25	2.125X10 ⁻⁶
		0.7	7X10 ⁻⁶	1,25	2.125X10 ⁻⁵
c	conglomerado	0.4	7X10 ⁻⁷	1,5	3.675X10 ⁻⁶
		0.4	7X10 ⁻⁵	1,5	3.675X10 ⁻⁴

* Valores más cercanos con respecto a los materiales de los estratos

** Valores estimados de las secciones geoelectricas.

A partir de estos valores podemos obtener la velocidad del radionúcleido (Ra-226) en cada estrato utilizando la ec. 15. En este caso los valores del Kd son los siguientes;

Tipo de estrato *	Kd mín. (cm ³ /g)	Kd máx. (cm ³ /g)
Arcilla	6.96X10 ²	5.6X10 ⁴
Arena	1.06X10 ²	3.8X10 ⁴

* Por ser los materiales más semejantes al caliche, arena conglomerática y conglomerado se toman estos valores.

Para aplicar la ec. 15, formamos las siguientes tablas.

Estrato	Kd mín.	Φmín/máx	ρ(g/cm ³)	Vw(cm/s)	V: cm/s
a	6.96X10 ²	0.016	1.78	1.4X10 ⁵	1.25X10 ⁻⁷
		0.249			2.81X10 ⁻¹¹
b	1.06X10 ²	0.05	2.07	2.125X10 ⁵	4.84X10 ⁻¹⁰
		0.256			2.48X10 ⁻⁹
c	1.06X10 ²	0.05	2.14	3.675X10 ⁵	8.1X10 ⁻¹⁰
		0.3			4.85X10 ⁻⁷

Estrato	Kd máx.	Φmín/máx	ρ(g/cm ³)	Vw(cm/s)	V: cm/s
a	5.6X10 ⁴	0.016	1.78	1.4X10 ⁵	2.25X10 ⁻¹²
		0.249			3.5X10 ⁻¹³
b	3.8X10 ⁴	0.05	2.07	2.125X10 ⁵	1.35X10 ⁻¹²
		0.256			6.92X10 ⁻¹¹
c	3.8X10 ⁴	0.05	2.14	3.675X10 ⁵	2.26X10 ⁻¹²
		0.3			1.36X10 ⁻⁹

* Estos valores son densidades aparentes promedio.

CAPITULO VII

DISCUSION

Es importante remarcar el hecho de que los valores de (Φ , ρ , y K_d) ecuación 15, son los que dan las condiciones más extremas para el flujo de Ra-226.

Para estimar el tiempo de migración del Ra-226 en el subsuelo y cumplir con los requisitos del TASK guía reguladora, (50), simplificamos los cálculos usando los parámetros más significativos como la porosidad, la densidad, el coeficiente de distribución, etc. con valores promedio para cada estrato y considerando los medios saturados a fin de extremar las condiciones de posible flujo de contaminantes radiactivos (51).

Los modelos usados son para flujo unidimensional, debido a que los modelos tridimensionales requieren datos de campo y las ecuaciones constitutivas exigen condiciones a la frontera que solo se pueden conocer después de estudios en la zona de depósito.

De los valores obtenidos en campo, de la profundidad, espesor, resistividad, consistencia física de cada capa, nos dimos cuenta de que son semejantes a los datos encontrados en la literatura referidos en el informe de caracterización elaborado por CUMULUS, S.A (4).

Para medios no saturados, este trabajo falla debido a que los parámetros en los modelos teóricos deban obtenerse después de mediciones en campo y en ensayos de laboratorio.

Para el desplazamiento de los radionúcleidos en los estratos del subsuelo intervinieron como factores, la velocidad del agua, las características absorbentes del medio y la porosidad del sustrato. Así, cuanto mayor sea la concentración iónica tanto mayor será la rapidez del movimiento de los radionúcleidos por desplazamiento sucesivos. Suponiendo un flujo unidimensional, el valor de la velocidad de dicho movimiento es, el de la ecuación 15, (30).

De las tablas se pueden informar algunos hechos; La velocidad máxima estimada del Ra-226 es del orden de 10^{-7} cm/s lo que es equivalente a 3.15 cm/año.

Las condiciones (Φ , ρ y K_d) son las extremas para cada estrato en la migración del Ra-226. De manera gruesa si la distancia que migra el radionúcleido es de 1000 metros el tiempo necesario será de aproximadamente 31,746 años y como la vida media del Ra-226 es de 1600 años, entonces habrán pasado 20 vidas medias de la actividad original (todo esto en el supuesto que la actividad del radionúcleido fuese realimentado).

Mediante la utilización de la ec. 15 y la vida media del Ra-226, podemos saber la distancia y el tiempo en que puede migrar el Ra-226 en las capas del subsuelo y saber de esta manera el posible daño que pueda ocasionarse a las cadenas tróficas del ecosistema (52).

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES

Los datos obtenidos por las ecuaciones anteriores y por las características físico-químicas de los suelos y propiedades físico-químicas del Ra-226, nos indican el tiempo y distancia de migración del isótopo en los diferentes estratos, nosotros concluimos que con la presencia de suelos con pH básicos y arcillosos, estos retienen más a los iones del isótopo, esto hace que sea más tardada la migración, lo cual hace cumplir nuestra hipótesis y objetivos, donde nuestro interés fue evitar que las aguas subterráneas sean contaminadas, ya que son éstas un eslabón de la cadena trófica.

A mayor distancia de recorrido del Radio-226 mayor es el tiempo que tarda en llegar a aguas subterráneas o superficiales, lo cual implica que en varios cientos de años, ninguna parte del ecosistema se verá afectada por la contaminación.

Dependiendo de que tan estricto sea el control de protección radiológica para el traslado y apilamiento de los jales, deberá haber menor impacto radiológico.

Los cálculos anteriores se hicieron suponiendo conservadoramente que los jales están depositados sobre los estratos sin la cubierta de arcilla de 30 cm de espesor. Esta arcilla tiene una permeabilidad del orden de 10^{-9} cm/s, debido a lo cual el tiempo de migración de la zona de depósito hasta su posible salida a la cuenca sería bastante mayor de lo calculado, en otras palabras nuestro tiempo calculado está sobreestimado.

Los cálculos se realizaron sobre la base teórica de que el medio se encuentra saturado, condición que es extrema ya que la velocidad del radionúcleido es mayor en sustratos saturados; esto también conduce a sobreestimar el tiempo de migración.

Nuestro interés no fue a nivel superficial ($0 < 30$ cm. de profundidad), ya que aquí no se puede cultivar, habitar, recrear y pastorear, más bien se le dió importancia a profundidades mayores de 70 m. donde el Radio-226 migra hacia los acuíferos y estos descargan en lagunas cercanas al sitio de depósito.

Los radionúcleidos más importantes que puedan contaminar al medio y a través de éste al hombre, son los jales donde se arrojan los lodos del procesado del mineral, principalmente radio y sus descendientes. Este radionúcleido contamina las corrientes de agua subterránea o también puede ser arrastrado por el agua de lluvia a corrientes superficiales.

La posibilidad de migración de los radionúcleidos hacia afuera de la microcuenca prácticamente no existe.

La dosis de radiación que podría recibir la población por consumo de agua o alimentos contaminados con Ra-226 es muy baja, debido a que existe escasa actividad económica y humana por ser el lugar árido, no hay pozos, sembradíos, bosques o ganadería.

REFERENCIAS

- 1.-Athié, M., 1981; Manual del Curso Sobre Impacto Ambiental, Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), Vol. 1 México, D.F., pp. 360.
- 2.-Vizcaino, F., 1975; La Contaminación en México, primera edición, Fondo de Cultura Económica, México, D.F., pp. 540
- 3.-OEIA; Manual de Vigilancia Radiológica del Medio Ambiente en Condiciones normales "Colección", Seguridad No.- 16, OIEA, Viena, 1987.
- 4.-Caracterización y Evaluación del Sitio para el Depósito de Jales de Beneficio de Uranio en la Sierra Peña Blanca, Chihuahua, CUMULUS, S.A. de C.V., Julio de 1994.
- 5.-Magidin, R., 1974; Tesis de Maestria, Normas de Protección Radiológica para la Población en General y Control de la Contaminación Radiactiva Ambiental en México, Química Nuclear, México, D.F., pp. 140.
- 6.-Donald, I., Denis, H., Pinawa y Manitoba, 1984; Soil Nuclide Distribution Coefficients and their Statistical Distributions; Atomic Energy of Canada Limited, Marshfield.
- 7.-Tejeda, S., 1995; Determinación del Coeficiente de Distribución entre suelo y Cs-137, ININ, México, pp. 33.
- 8.-Cotton, F. y Wilkinson, G., 1981; Química Inorgánica Avanzada, Ed. Limusa, pp.342.
- 9.-Hyde, E., Perlman, I., y Seaborg, G., 1964; The Nuclear Properties of the Heavy Elements II; Prentice-Hall, Inc.,
- 10.-Haissinsky, M., 1965; Radiochemical Survey of the Elements, pp.123-125.
- 11.-Greenwood, C. y Earnshaw, P, 1984; Chemistry of the Elements; Ed. Pergamon Press, pp.117-154.
- 12.-Pascal, P., 1960; Nouveau Traité de Chimie Minerele, Tomo IV, Masson, Et. Cie, Editeurs.
- 13.-Flores, J., 1990; Separación Ra/Ca por Intercambio Ionico, Tesis Profesional de Química, UAEM, Toluca, Méx., pp. 53.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

- 14.-Weast, W., 1970; Handbook of Radiological Health, U. S. Department of Health, Education and Welfare, pp. 6-365.
- 15.-Guimond, R. y Hardin, M., 1989; Radiotomical Physics Chemistry, Int., J., Radist. Appl. Instrum. Part. C. 2, 34, pp. 309-315.
- 16.-Godinez, M^a. del C., 1995; Determinación de Ra-226 en Fertilizantes Fosfatados y en Yeso Mediante Espectrometría Gamma, Tesis Profesional de Química, UAEM, Toluca, Méx., pp.60.
- 17.-Ivanovich, M. y Harmon, R., 1982; Uranium Series Disequilibrium, Applications to Environmental Problems, Clarendon Press Oxford.
- 18.-Kirk, Othemer., 1983; Encyclopedia of Chemical Technology, Jhon Wiley and Sons. U.S., tercera edición, 19, pp. 654-656.
- 19.-Nuclear Technology, Nov. 1982; U.S.A., vol. 59, No- 2, pp. 291-301.
- 20.-Pilcher, R., 1979; Geology and Uranium Mineralization of Sierra Peña Blanca. Prepared for Plateu Resources Limited (ined.)
- 21.-Ruíz, M., 1995; Informe Final de Seguridad del Transporte y Almacenamiento de Esteriles de Uranio Ubicado en la Sierra de Peña Blanca, Chihuahua, ININ, México, pp. 29.
- 22.-Cruz, S., 1995; Migración de Ra-226 en la Zona de Jales de Peña Blanca Chihuahua, ININ., México, pp. 13.
- 23.-Streeter, V. L, 1976; Mecánica de Fluidos, segunda edición, Mc Graw Hill, México, D.F. pp.641.
- 24.-Stanley, D., y Roger, M., 1971; Hidrogeología, ediciones Ariel, Segunda edición, Barcelona, pp. 563.
- 25.-Gastany, G., 1975; Prospección y Explotación de las Aguas Subterráneas, ediciones omega, Barcelona, pp. 738.
- 26.-Boyd, J. M., Carter, T. G., Knapp, R. A., Culver, K. B., Nov. de 1992; Hydrogeological Investigations and Evaluation of the Stanleigh Mine Tailings Impoundment Site., en Management of Wastes from Uranium Mining and Milling, Organismo Internacional de Energía Atómica, STI/PUB/622, Viena, Austria, pp. 141-156.

- 27.-Juárez, E. y Rico, A, 1980; Mecánica de suelos tomo I, fundamental, editorial Limusa, México D.F., pp. 642.
- 28.-Miltón, B. y Dobrin, 1969; Introducción a la Prospección Geofísica, Editorial Omega, S.A., Barcelona, España, segunda edición, pp. 483.
- 29.-Calas, G., 1977; Les Phenomenes D'alteration Hydrothermals et leur relation avec les Mineralization Uraniferes en Milieu Volcanique; le cas des Ignimbrites Tertiaires de Sierra de Peña Blanca, Chihuahua, (Mexique). Sci., Geol., Bull., 30, 1 Strasbourg, pp. 3-18.
- 30.-Higgins, G. H, 1959; Evaluation of the ground-water contamination hazard from underground nuclear explosions; Jour. Geophys. Research, v. 64, pp. 1509-1519.
- 31.-Mayer, S. y Tompkins, E, 1947; Ion exchange as a separations method; A theoretical analysis of the column separations process; jour. am. chem. sol. v. 69, pp. 2866-2874.
- 32.-Alvarez, M. Jr., 1966; Provincias Fisiográficas de la Republica Mexicana, AGPM..
- 33.-Galindo, I., y Chavéz, A., 1977; Estudio del Clima Solar de la Republica Mexicana, Instituto de Geofísica, UNAM, Servicio Meteorológico Nacional.
- 34.-Instituto de Ecología, Laboratorio del Desierto UNESCO, Chihuahua.
- 35.-Rzedowski, J., 1994; Vegetación de México, editorial Limusa, sexta reimpression, México, D.F., pp. 432.
- 36.-Bravo-Hollis, Helia, (1978): Las Cactáceas de México, segunda edición, UNAM, vol. 1, México, D.F. pp. 743.
- 37.-CODE OF FEDERAL REGULATIONS, 10 CFR 20, United. States Government, Washington, Enero de 1994.
- 38.-García, E, 197): Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen; para Adoptarlo a las condiciones de la República Mexicana, Instituto de Geografía, UNAM, México, D.F, segunda edición, pp. 246.
- 39.-Tovar, J. y Valencia, J., 1974; First day road log, Ojinaga to Chihuahua City, Geológicoal Field trip Guide Book Through the States of Chihuahua and Sinaloa, México, West texas Geológicoal Soc., Public. No- 74-3, pp. 7-44.

- 40.-Enos, 1974; Reefs, Plataforms and Basins of Middle Cretaceous in Northeast México, AAPG. Bull., V. 58, pp 800-809.
- 41.-Deford, R. y Haenggi, W., 1970; Stratigraphie Nomenclature of Cretaceous Rocks in Northeastern Chihuahua Tectonic Belt: West Texas Geol. Soc. Pub. 71-59, pp. 60-61.
- 42.-Stege, B., 1979; Stratigraphy and Significance of the Carbonates of the Peña Blanca Uranium District, Chihuahua, México, M.S. Thesis, UTEP.
- 43.-Bockoven, N., 1981; Tertiary Stratigraphy of the Sierra del Gallago area of Chihuahua, With comparision to the Peña Blanca Uranium district. in.
- 44.-Alba, L. y Chávez, R., 1974; K-Ar Ages of Volcanic rocks from the Central Sierra Peña Blanca, Chihuahua, México, Isochron West, No- 10, pp. 21-23.
- 45.-Informe de Seguridad del Proyecto Minero de Peña Blanca, Estado de Chihuahua, Estudios Basicos de Ingeniería y Reporte Final de la Construcción, Abril de 1994.
- 46.-Ruiz Marco A, Rojas Vidal, Molina G, Angeles A, Cruz S, Lizcano D, Reyes José L, (1995); Experiencia en el Proceso de Traslado y Almacenamiento de Esteriles de Uranio de la Ciudad de Aldama a la Sierra de Peña Blanca, en el Estado de Chihuahua, México; III Congreso Regional sobre Seguridad Radiológica y Nuclear; Congreso Peruano de Protección Radiológica, Cusco Perú, del 23-27 de Octubre.
- 47.-Cantos, J, 1978; Tratado de geofísica aplicada, segunda edición, editorial Madrid, pp.520.
- 48.-Mooney, H. 1956; Computer Program for Potentias in Resistivity, University of Minnesota Press, Minneapolis, pp. 165.
- 49.-Orellana, E. 1966; Tablas y Curvas Patrón para Sondeos Eléctricos, Ed. Interciencia, Madrid, pp. 245.
- 50.-U.S. Nuclear Regulatory Commission Draft Regulatory Guide and Value/Impact Statement TASK ES 115-4 (1983); Guidelines for Modeling Ground-Water Transpor of Radioactive and Nonradiactive Contaminants at Tailings Disposal Sites.
- 51.-ICRP., 1966; Recommendations of the ICRP Adopted Sept. 17,1965, ICRP Publication 9, Pergamon Press.
- 52.-Russel, R. S., 1966; Radioactivity and Human Diet. Pergamon Press, (Ed.).