

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

**EFFECTO DE ADSORCIÓN DE RADÓN (^{222}Rn) EN EL
SISTEMA RESPIRATORIO**

TESIS

Que para obtener título de:

Biólogo

PRESENTA

VIANEY CABELLO FIGUEROA

Director de tesis:

DR. FAUSTINO JUÁREZ SÁNCHEZ

INSTITUTO DE GEOFÍSICA

Ciudad de México, 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Mi tesis va dedicada a...

A mi papá, por todo el apoyo que me ha brindado, por sus pláticas, sus historias, a pesar de no ser la hija perfecta tengo un padre que vale más que cualquier tesoro en el mundo, gracias por estar conmigo en todo momento, te quiero mucho.

A mi mamá por siempre motivarme a ser mejor, por confiar en mí y por comprenderme. Tus consejos siempre me ayudan a tomar la mejor decisión.

A mi hermano, tú eres mi mayor razón para proponerme metas y cumplirlas, quiero demostrarte que si yo lo puedo hacer tú lo harás muchísimo mejor que yo.

Irvyn, Gracias por escuchar mis pensamientos, por comprender mis sueños, por convivir con mis defectos y por ayudarme a crecer.

A mi familia extensa, mis abuelos, mis tías, mis primos.

A mis amigas y amigos, que me ayudaron a construir mi vida universitaria, cuando nos divertíamos y cuando estudiábamos. Estoy segura de que ustedes serán grandes profesionistas y siempre estarán en mi corazón.

En especial las niñas, son muchas así que no pondré nombres. ¡Las amo!

Agradezco profundamente a mi gloriosa Universidad y a mi Facultad por brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente, además al Instituto de Geofísica por abrirme sus puertas para hacer este proyecto posible.

Al Dr. Faustino Juárez Sánchez, aparte de ser mi director de tesis ha sido un ejemplo de disciplina, esfuerzo y superación. Gracias por confiar en mí y complementarme con su conocimiento y experiencia durante todo el proyecto.

A mi directora interna Biól. Elvia García Santos por sus enseñanzas y su paciencia, desde que fue mi profesora hasta que tuve la oportunidad de que fuera mi asesora interna. Es una mujer admirable y una grandiosa académica,

A mis sinodales, Biól. Aída Zapata Cruz, Biól. Irene Castillo Chaires y M. en C. Germán Calva Vásquez, por sus acertadas recomendaciones, no solo por la contribución a mi trabajo sino porque siempre tuvieron palabras de aliento hacia mi persona y mostraron un gran interés en mi formación profesional. Para mí es un honor tenerlos como sinodales. Gracias por enseñarme que la Biología no solo es una profesión, es una forma en la que puedes ayudar a tener un mejor lugar para vivir.

Y a todas las personas que contribuyeron en el desarrollo de mi tesis: Dr. Allan Chavarría y todos los compañeros del Laboratorio de Radiactividad Natural del Instituto de Geofísica, UNAM.

Contenido

RESUMEN	6
CAPÍTULO I.....	8
INTRODUCCIÓN.....	8
ANTECEDENTES	10
EFECTOS DEL ²²² Rn EN EL SER HUMANO.....	14
EFECTO DEL ²²² Rn EN PULMÓN.....	19
FISIOLOGÍA DEL SISTEMA RESPIRATORIO.....	23
QUELATOS.....	34
BIOPOLIMEROS	36
MÉTODOS DE DETECCIÓN DE ²²² Rn.....	37
DETECTORES PASIVOS	37
DETECTORES ACTIVOS	41
CAPÍTULO II	45
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	45
JUSTIFICACIÓN.....	45
HIPÓTESIS.....	46
OBJETIVOS.....	47
METODOLOGÍA	48
LABORATORIO:.....	48
CAMPO	49
TRABAJO DE GABINETE.....	49
DESARROLLO EXPERIMENTAL	50
Material.....	51
Equipo.....	52
Reactivos.....	52
PROCEDIMIENTO	54
CAPÍTULO III.....	86
RESULTADOS	86
CAPÍTULO IV.....	107
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	107

CONCLUSIONES	112
BIBLIOGRAFÍA	113
ANEXOS	120
GLOSARIO	120
CURVA DE CALIBRACIÓN ²³⁸ U	126
ÍNDICE DE FIGURAS	127
ÍNDICE DE TABLAS	129
ÍNDICE DE GRÁFICAS	129

RESUMEN

El radón, es el único elemento gaseoso noble que es radiactivo natural, los gases son de interés especial, primero, porque son móviles y pueden recorrer grandes distancias tanto en la tierra como en la atmósfera, segundo, porque su inhalación o ingestión puede ser un problema de salud. El radón al ser un gas provoca que no se inmovilice por la reacción química con el medio del que está permeando, como resultado, el radón libre normalmente solo disminuye por su decaimiento radiactivo.

La importancia de conocer la concentración del radón se debe a que la exposición por períodos prolongados a este gas causa cáncer pulmonar.

Los niveles de radón en los exteriores son generalmente bajos debido a la dilución con corrientes de viento, sin embargo, en áreas cerradas como casas, escuelas y edificios, los niveles de radón se incrementan, porque el Rn^{222} entra a través de grietas de los cimientos, paredes, sistemas hidráulicos y en general cualquier fisura, principalmente en el basamento de la construcción.

Las personas que están en mayor contacto con el radón a lo largo de su vida son los mineros de minas subterráneas, principalmente de minas de uranio, sin embargo, en todas las minas pueden presentarse concentraciones elevadas de radón, ya que el origen del radón son los minerales que contienen uranio y/o en bajas o altas concentraciones, y estos elementos se encuentran distribuidos en toda la corteza terrestre.

El radón en interiores, es un riesgo para la salud, ya que debido al decaimiento radiactivo que presenta, sus productos de decaimiento son sólidos que se fijan en las mucosas del sistema respiratorio y continúan decayendo, por lo tanto, emitiendo radiación. Si hay una exposición de radón a largo plazo y a concentraciones elevadas, esto aumenta las posibilidades de desarrollar cáncer de pulmón.

Es importante contar con un dosímetro que permita estudiar el grado de adsorción en el tejido expuesto al ^{222}Rn , de forma segura y sin recurrir a las tradicionales biopsias, en este trabajo se realizaron pruebas con un material seleccionado y

expuesto a concentraciones conocidas de Rn, así como en pruebas de campo, concretamente en aguas termales en las cuales se detectó la presencia de radón y en una mina turística del Estado de Hidalgo.

El material elegido es un biopolímero de colágeno obtenido a partir de los animales, que se usa en la industria alimentaria y es de fácil adquisición, denominado grenetina. Se le añadió una fórmula de yodo para evitar la contaminación por hongos para que al ser expuesto a la radiación también fuera resistente al ambiente.

En las exposiciones a radiación ionizante conocida se obtuvo una correlación entre el tiempo y la cantidad de partículas alfa impactadas en el biopolímero. En la parte experimental se encontraron los efectos del radón en su decaimiento y emisión de partículas alfa, las cuales interactuaron con el tejido y dejaron evidencia de la traza nuclear y el poder de penetración. Con esta información, se procedió a comprobar el efecto de un emisor como el mineral de Uranio frente a las diferentes formulaciones del biopolímero, encontrando la formulación adecuada que no presenta burbujas y fija la traza nuclear como el tejido.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El cáncer de pulmón constituye uno de los principales problemas sanitarios, porque tiene mayor incidencia y mortalidad en varones; mientras que en mujeres es el cuarto en incidencia y segundo de mortalidad (Malvezzi et al., 2013; Ferlay, Parkin y Steliarova-Foucher, 2010). Representa el 13% de los casos y el 18% de todas las muertes por cáncer en los países desarrollados (Jemal et al., 2011; Barbosa-Lorenzo et al., 2015).

El cáncer de pulmón es una enfermedad de etiología multifactorial. Su principal factor de riesgo es el tabaco, seguido del radón. El radón es la segunda causa de cáncer de pulmón y la primera en sujetos que nunca han fumado (López et al., 2006; WHO, 2009).

El radón es un gas radiactivo generado naturalmente por la desintegración de los elementos radiactivos como: uranio, torio y radio presentes en las rocas y en los suelos; a partir del ^{226}Ra , el cual se encuentra en la cadena de decaimiento de ^{238}U Figura 1.1. (Attix, 1986).

La vida media del ^{222}Rn es de 3.82 días, en la cadena de decaimiento le sigue ^{218}Po con 3.05 minutos, ^{214}Pb con 26.8 minutos, ^{214}Bi 19.7 minutos, ^{214}Po 1.64×10^{-4} s y ^{210}Pb 21 años (Schmidt et al., 2008; Rickards, Golzarri y Espinosa, 2010; Long et al., 2016) Figura 1.1.

Los productos de decaimiento del radón provocan además del daño en el sistema respiratorio, daño en el sistema digestivo. Los humanos están expuestos de manera constante, por lo tanto la detección de las concentraciones de radón son de particular interés para la salud pública (Long et al., 2016; Kitto et al., 2014; Durán et al., 2014).

En los peores casos, cáncer de pulmón. Los humanos están expuestos de manera constante, por lo tanto la detección de las concentraciones de radón son de

particular interés para la salud pública (Long et al., 2016; Kitto et al., 2014; Durán et al., 2014; Torres-Durán et al., 2014).

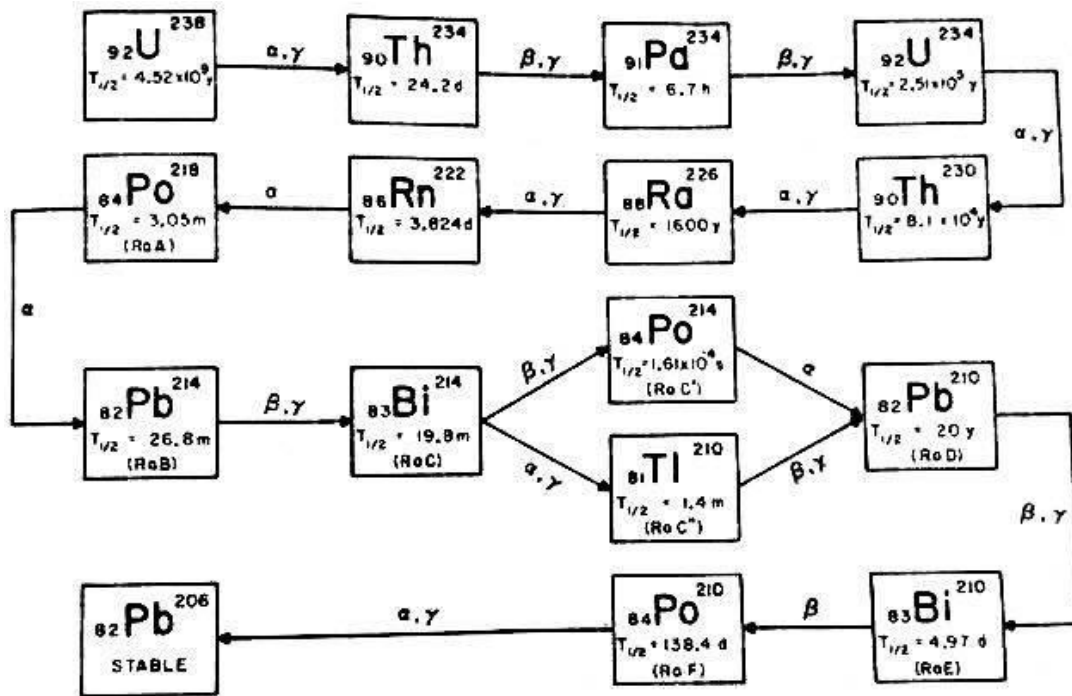


Figura 1. 1 Series de decaimiento $^{238}\text{Uranio}$ (Attix, 1986).

Este gas es incoloro, sin sabor, ni olor, por lo tanto solo puede ser medido con equipos especializados (Garzón, 2006); es el isótopo de mayor importancia, dado que es el isótopo con mayor vida media (3-8 días), debido a esto y a sus propiedades de gas noble, la posibilidad de transporte dentro del suelo, en agua y en la atmosfera hace que sea un trazador natural con aplicaciones geofísicas, geoquímicas, hidrológicas y atmosféricas, es una herramienta útil a la humanidad (Hinojo et al., 2013).

El efecto en la salud humana producido por el ^{222}Rn es importante, porque es considerado la causa de cáncer en pulmón, al que la población en general está expuesta (Hinojo et al., 2013; Juárez, 2014). Esto se da porque el radón se desintegra formando minúsculas partículas radiactivas, algunas permanecen en el aire pero cuando son inhaladas e ingresan en el organismo, producen bombardeos radiactivos que afectan las células de los pulmones (Deetjen, 1997; Garzón, 2006).

El personal expuesto en ambientes cerrados, ya sean minas o construcciones con nula o poca ventilación, incluyendo la recirculación de aire por sistemas de enfriamiento, tienen mayor riesgo de exposición a este radioisótopo, recordando que la mayor fuente de este gas es el suelo, seguida por los materiales de construcción. (Juárez, 2014).

Por lo tanto, es muy importante conocer los niveles de radón y evaluar sus concentraciones en interiores, para conocer los riesgos radiológicos (Hinojo et al., 2013).

Las concentraciones de ^{222}Rn varían dependiendo de diversos factores, principalmente cuál es la concentración de ^{238}U en los suelos aledaños, en los materiales de construcción, condiciones atmosféricas, el estilo de la arquitectura, la porosidad del suelo y la ventilación (Espinosa y Gammage, 2011; Hinojo et al., 2013).

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, por sus siglas en inglés) dicta que el valor máximo permisible de ^{222}Rn es de 200 Bq/m^3 (ICRP, 2009).

ANTECEDENTES

Los primeros estudios relacionados al cáncer de pulmón originado por radón se remontan al siglo XVI cuando en las poblaciones mineras Alemanas de Schneeberg, Bohemia, se dieron defunciones por cáncer de pulmón conocidas como “Schneeberger Krankheit”; Harting y Hesse en 1879 utilizaron por primera vez el término Cáncer Pulmonar (Andreev y Selenezkaya, 1989). En 1909 se realizaron las primeras mediciones instrumentales en las minas de Schneeberg, revelando altas concentraciones de gas radón; se planteó por primera vez la relación entre la acumulación del gas radón y los problemas respiratorios que padecían los mineros.

Esto confirmó los estudios realizados por Rajewsky quien midió la actividad de partículas alfa en minas de Scheeberg y muestras tomadas para análisis histopatológicos de pulmón provenientes de mineros que habían muerto de cáncer de pulmón (Hueck, 1939; Rajewsky, 1940). Algunas décadas después una observación similar fue hecha por Joachimsthal en Checoslovaquia.

Con base a estos estudios Rajewsky pudo establecer una causal entre el radón y el cáncer de pulmón, algunos años después se confirmó que la exposición a radón conlleva a un riesgo de salud pública.

En 1951 grupos de investigadores teóricos y experimentales, utilizando animales de laboratorio (ratas y conejos), trataron de establecer una correlación entre el radón y el incremento de los casos de cáncer de pulmón observados en Europa y Estados Unidos, sin embargo el papel etiológico (causante de la enfermedad) del radón y sus productos para producir el cáncer de pulmón no fue entendido hasta 1960 cuando en los mineros, de minas de uranio en Estados Unidos surgieron casos de cáncer en pulmón asociados a minerales radiactivos (Suzuka et al. 1991; Ma et al., 1996; Garzón, 2006; Juárez, 2014).

También se descubrió, una correlación entre la incidencia de leucemias, melanomas y cáncer en menores por los niveles de radón en casas en varios países (Henshaw, Eatough y Richardson, 1990). Richardson, Eatough y Henshaw (1991) sugieren que el riesgo de leucemia está inducido por la exposición a radón.

La ingestión de radionúclidos por encima de los niveles aceptables es otro riesgo a considerar. El uranio natural tiene una mezcla de tres isótopos que son ^{235}U , ^{234}U y ^{238}U , asimismo se encuentra también el ^{231}Th y Np , todos estos isótopos son radiactivos y decaen a torio, radio, radón, etc. hasta llegar a un isótopo estable de plomo (Baird, 2001).

El uranio es un elemento radiactivo natural, pesado y tóxico, se encuentra en casi todos los tipos de suelos, rocas, arenas y agua; bajo ciertos ambientes geológicos el uranio se separa como un mineral discreto y forma depósitos, los compuestos de

uranio presentes en la corteza de la tierra son solubles en agua y entran al cuerpo humano a través de la comida y al beber agua, las sales de uranio son altamente tóxicas. Se asocia con cáncer de pulmón y de huesos (Ribera, 1996; Shi, 2016). La combinación de estos compuestos con el grupo de los fosfatos sobre la superficie celular causa el bloqueo de los procesos metabólicos normales que son esenciales para la supervivencia de la célula, también pueden causar daño al riñón impidiendo la eliminación normal de los desechos causando disfunción renal (Carvalho, 2005; Shi, 2016).

El radio es un elemento radiactivo que decae a radón emitiendo partículas α seguidas por radiación β , la concentración de radio determina cuantos átomos de radón se formarán, estos átomos producidos se liberan en forma diferencial en función del medio, por ejemplo: la emanación a partir de un grano de mineral o material y su migración a un poro o fuera del mineral, dependerá de la posición original de los átomos de radio en el mismo grano de la textura y del tamaño del grano, de la permeabilidad, la temperatura y presión (Bragg, 1905). Para la determinación de los átomos de radón inicial se requiere la estimación de uranio y radio como progenitores.

Los riesgos a la salud causados por el radón (^{222}Rn) y el torón (^{220}Rn) no son debidos a estos isótopos de manera directa, sino a los productos de decaimiento del radón (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi y ^{214}Po) que están en la fase condensada y se fijan en la superficie, en este caso de las mucosas, alveolos y epitelio delgado del pulmón en donde continúan decayendo con la emisión de partículas alfa y beta siendo el isótopo de mayor duración de los cuatro, el ^{214}Pb con una vida media de 27 minutos, en la secuencia de decaimiento. El resultado consiste en que las superficies sensibles de los bronquios son irradiados por este decaimiento, el más energético y destructivo de estos, porque posee una alta ionización y un rango corto para las partículas alfa se da a partir de los isótopos de ^{214}Po y ^{218}Po ; un tercer isótopo con actividad alfa es el ^{210}Pb quien contribuye relativamente un poco a las mediciones de radón porque tiene una vida media de decaimiento de 22 años y decae a ^{210}Po

^{220}Rn como se puede observar en la Figura 1.1 (Quindós et al., 1989; Juárez, 2014; Moosakhani et al., 2016).

El ^{220}Rn es un isótopo producto del decaimiento natural del ^{232}Th , se le dice comúnmente “torón”, su vida media es de 55.6 segundos, y emite radiación alfa.

De manera similar existe el ^{219}Rn que deriva del actinio, que es un emisor de partículas con una vida media de 3.96 segundos.

El ^{220}Rn es transportado de las porciones de los bronquios a los pulmones, excepto en los puntos en donde existe bifurcaciones en el árbol bronquial. Sus efectos en la salud pueden estar asociados a los del ^{212}Po que decae con la partícula alfa, las altas dosis al pulmón se deben a los hijos del producto de decaimiento del ^{222}Rn , este isótopo es el que más se mide en los hogares, esto es apropiado para tener mediciones menos caras y porque los factores de equilibrio son relativamente constantes (Durrani y Ilic, 1997; Moosakhani et al., 2016).

Los productos del decaimiento del radón conllevan una carga eléctrica cuando se forman y tienden a fijarse e interactuar con superficies de partículas de polvo en el aire, algunas permanecen sin realizar una fuerte interacción, (la fracción sin interactuar mayormente mediante radiación alfa con el epitelio bronquial). En los últimos trabajos, se ha encontrado que una gran fracción se deposita en los bronquios. El radón como tal, al ser gas no se deposita y por lo tanto no contribuye a la irradiación alfa al epitelio bronquial en su fase gaseosa y es relativamente marginal, el efecto solo es notorio hasta el decaimiento radiactivo y son los hijos que al continuar decayendo afectan los bronquios.

Las partículas alfa viajan menos de 100 micrómetros en su lugar pero sus altas energías causan una intensa ionización local, con lo cual aumenta el riesgo subsecuente para que se desarrolle un cáncer; la radiación beta y gama solo se presenta a partir de algunos productos de decaimiento, pero contiene una menor energía comparada a la que se hace por la radiación alfa, y su efecto es relativamente marginal (Salgado-Espinosa et al., 2015).

En los monitoreos de ^{222}Rn realizados en México, en minas abandonadas se encontraron concentraciones mayores a 3190 Bq/m^3 (Hinojo et al., 2009; Hinojo et al., 2013).

EFECTOS DEL ^{222}Rn EN EL SER HUMANO

La teoría de la dispersión y la transferencia de energía de los electrones de alta energía cinética, aclara que la interacción de la radiación con las moléculas en el medio absorbente no es a través del fotón inicial, sino a través de la transferencia de energía desde partículas de carga de alta energía cinética, creadas por los procesos de dispersión. Excepto en casos inusuales, como la interacción de neutrones con sistemas tisulares, estas partículas cargadas secundarias, serán electrones de alta energía cinética. La interacción de estas partículas da como resultado la transferencia de parte de la energía cinética del electrón a moléculas del medio absorbente, en donde la radiación incidente reacciona con los átomos de la materia a lo largo de su recorrido. (Alpen, 1998).

La condición estocástica de la trayectoria de electrones al depositar la energía no se describe adecuadamente por las formulaciones matemáticas habituales. La ecuación del poder de frenado de Bethe-Bloch, describe el proceso de transferencia de energía de un electrón de desaceleración como un proceso continuo. Es decir, se considera que la energía se deposita en una corriente continua más que en la forma discreta y punteada que se produce en el caso real. Esto ha llegado a ser conocido como la aproximación de ralentización continua. Porque la energía de la radiación incidente disminuye, disminuyendo la velocidad de la partícula y aumentando las probabilidades de que haya una nueva interacción. Es en el final del recorrido del fotón o partícula incidente cuando más interacciones tienen lugar. El depósito de energía no es uniforme sino progresivo a lo largo del trayecto. La aproximación de Bethe-Bloch, que es adecuada para cuestiones de física general, resulta inadecuada para describir los eventos que finalmente conducen a alteraciones moleculares en el medio. Por ejemplo, si examinamos las pistas de dos

electrones de igual energía cinética inicial y una posición inicial idéntica, la distribución de eventos a lo largo de la pista será diferente y así será la ubicación física de las vías. Sólo para las radiaciones de transferencia de energía lineal (TEL) muy altas, la aproximación de desaceleración continua se aproxima a la realidad (Alpen, 1998).

El término TEL expresa la cantidad de energía media cedida por una partícula en una distancia de una micra.

Para tener un resultado biológico de un evento de irradiación, debe haber una interacción química de las especies reactivas con biomoléculas importantes para conducir en última instancia a una interferencia en el funcionamiento celular normal (Alpen, 1998).

El principal efecto de la radiación ionizante inducida por la transformación química, es decir, donde estos cambios pueden ser biológicamente importantes para la supervivencia celular es el ADN. La molécula transporta la información genómica necesaria para la autor replicación, la renovación bioquímica en la célula y la división celular. Parte del daño inducido por la radiación será el resultado de la acción indirecta de los productos de la hidrólisis del agua; parte de ella será el resultado de la acción directa sobre la molécula de ADN. Aunque el ADN es el objetivo principal, está claro que otras moléculas bioactivas en la célula también experimentan desactivación como resultado de daño directo e indirecto por radiación. Pueden mantenerse pérdidas muy grandes en la actividad biológica de la mayoría de las especies moleculares en la célula distintas del ADN sin grave déficit funcional. Las enzimas, por ejemplo, se sintetizan continuamente y se reemplazan las moléculas dañadas.

En radiobiología, una dosis o una tasa de dosis baja se refiere a situaciones en las que resulta muy improbable que ocurra más de un evento de absorción de energía de la radiación en las partes críticas de una célula, antes de que puedan actuar en ella los mecanismos de reparación. Las dosis de radiación bajas serían aquellas similares a la exposición al fondo natural de radiación.

Los efectos de las radiaciones ionizantes sobre un organismo vivo son el resultado de una compleja serie de fenómenos. Los procesos iniciales son la ionización y excitación de los átomos o moléculas a lo largo de las trayectorias de las partículas ionizantes. Esta deposición de energía origina reacciones químicas y finalmente efectos biológicos.

El daño en tejido puede ser visible y semeja quemaduras (Vasudeva, 2017) figura 1.2

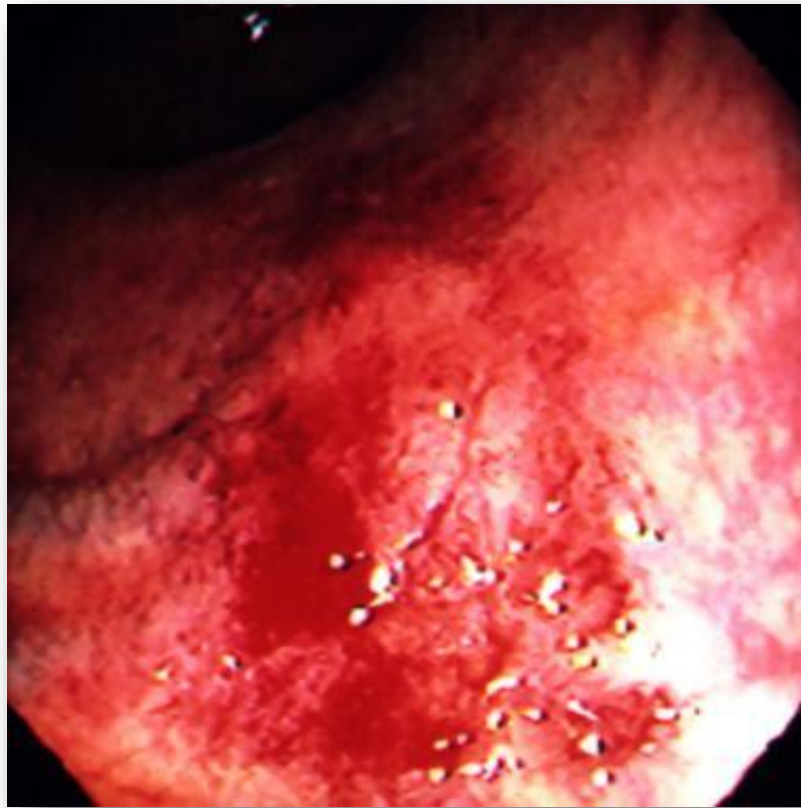


Figura 1. 2 Heridas por radiación en intestino ocasionadas por radioterapia interna para tratar cáncer de próstata (Vasudeva, 2017)

Aunque la toxicidad fue el factor limitante en los primeros años, los avances en la tecnología hicieron posible la administración de altas dosis de radiación a tejidos seleccionados de forma localizada, lo que aumentó la eficacia y aumentó el uso de la radiación en el armamento de la terapia contra el cáncer. Muchos pacientes

con cáncer reciben alguna forma de radiación como parte de su terapia contra el cáncer, por lo tanto la lesión inducida por radiación es probable sea una ocurrencia frecuente a pesar de las mejoras en la tecnología de radiación. En la actualidad se ha evaluado el daño por radiación inducida debido a la radioterapia en el sistema digestivo, utilizando biopsias.

La característica más importante del ADN que hace que su destrucción o alteración crucial para la supervivencia celular y la autorreplicación, es que el genoma total es único en cada célula. Hay una redundancia muy limitada de información en esta molécula, y cuando se produce un daño irreversible, puede conducir a la pérdida de la codificación genética que es vital para la función celular y la supervivencia.

Al examinar la consecuencia del daño molecular a una enzima intracelular vital, si tal enzima es una molécula de proteína grande, sufrirá daños radiolíticos significativos como resultado de una acción directa o indirecta. La pérdida de la función enzimática e incluso de una proporción significativa de las moléculas disponibles no causa pérdida de la función misma. Además, la célula reemplaza continuamente moléculas biológicas importantes. Para esta última función, la célula depende en última instancia de la codificación almacenada en la molécula de ADN (Alpen, 1998).

Este gas noble radioactivo ^{222}Rn posee descendientes que pueden causar daño sustancial a los sistemas respiratorio, hematopoyético y digestivo (Durán et al., 2014) La inhalación puede conllevar a cáncer de pulmón. Hay muchos seres humanos que tienen una exposición constante al radón, por lo tanto la detección sensible y confiable de las concentraciones de radón es de interés (Long et al., 2016).

El mecanismo biológico utilizado por los descendientes de radón, principalmente $\text{Po}^{218,214}$, para producir cáncer de pulmón no es bien conocido. Podría implicar cambios genéticos y epigenéticos en el proceso plasmático. (Durán et al., 2014)

Estudios epidemiológicos y experimentos en animales han demostrado la alta incidencia de cáncer de pulmón por exposición a este gas (Chen et al., 2012; Chen

et al., 2015). En estudios con ratas, se ha reportado que una exposición a largo plazo con ^{222}Rn induce alteraciones patológicas en los bronquios y en el parénquima del pulmón (Xu et al., 2008; Chen et al., 2015).

Los micro RNAs como RNAs no codificantes, regulan procesos biológicos fundamentales a través de reguladores post-transcripcionales de expresión de genes. Esta evidencia sugiere que la alteración de los microRNAs está envuelta en el inicio, progreso y metástasis de algunos tipos de cáncer en humanos (Di Leva y Croce, 2010; Chen et al., 2015; Filipowicz, Bhattacharyya y Sonenberg, 2008).

Los micro RNAs de la familia let-7 han demostrado su acción como tumor supresores, porque inhiben oncogenes, además de ser parte clave de reguladores de caminos mitogénicos como son RAS, MYC Y HMGA2. Se ha reportado que algunos let-7 estar correlacionados con el crecimiento tumoral y clasificaciones patológicas, por instancia let-7a y let-7f se encuentran en la regulación de cáncer en humanos. En ratones se ha observado una supresión del crecimiento del cáncer (Filipowicz, Bhattacharyya y Sonenberg, 2008).

La inhalación de ^{222}Rn y sus productos de decaimiento contribuyen en una fracción importante (55%) de la dosis de radiación del entorno natural de los humanos (UNSCEAR, 2000), de la cual, su contribución máxima se atribuye a los productos de decaimiento.

Cuando el aire con radón y sus productos de decaimiento son inhalados, los productos se depositan en la superficie del tracto respiratorio, resultando en una dosis de inhalación, generalmente calculada con la siguiente ecuación (Eappen et al., 2006; Stojanovska et al., 2014; Rout et al., 2014):

$$D(nSv h^{-1}) = C_0(0.17 + 9F)$$

Cuando C_0 es la concentración de gas radón (Bq m^{-3}) a la cual la persona fue expuesta, 0.17 y 9 nSv (Bq h m^{-3}) $^{-1}$ son la dosis de conversión factor (DCF) de radón y su progenie respectiva (UNCEAR, 2000) y F es el factor de equilibrio del radón. Se piensa que el valor de default de 0.4 está bien asignado al factor de equilibrio

del radón. Otros estudios han mostrado que F tiene un rango de valores dependiendo de las condiciones ambientales. Esta variación en F puede darse por diferentes valores de dosis en la misma exposición. Otro factor importante es la fracción desunida que afecta la dosis de inhalación. Los productos de decaimiento recién formados del tamaño de rango 0.5-5 nm con un significado alrededor de 1 nm, el cual no es unido a aerosoles son denominados buenos/fracciones desunidas. Esas fracciones desunidas cuando se unen en partículas de aerosol, están referidas en la fracción desunida. Ellas están en el rango de 10 nm a 1 micrómetro, con un significado del tamaño alrededor de 200 nm. Se ha observado que las dosis de conversión factor (DCF) cual convierte los productos de decaimiento del radón en concentración de inhalación, dosis, varían con la fracción desunida (Rout et al., 2014).

La exposición al radón residencial podría aumentar el riesgo de cáncer de pulmón para los no fumadores. Sin embargo, se debe investigar más para saber exactamente la magnitud de este riesgo. Se necesitan estudios de casos y controles mejor diseñados (Durán et al., 2014).

Es también necesario aumentar la sensibilización de los ciudadanos y las administraciones para que puedan establecer las medidas de protección y mitigación necesarias contra el radón residencial (Durán et al., 2014).

EFEECTO DEL ^{222}Rn EN PULMÓN

El cáncer de pulmón es la primera causa de mortalidad en el mundo, con más de 1.400.000 muertes anuales (Malvezzi et al., 2013). El radón es el segundo factor de riesgo para el cáncer de pulmón (Choi y Mazzone, 2014; WHO, 2009).

El consumo de tabaco es el principal factor para desarrollar esta enfermedad, sin embargo entre el 10% y 25% de todos los casos (Jemal et al., 2011; Torres-Durán et al., 2014), ocurren a personas que nunca han fumado. Aunque a primera vista podría parecer un porcentaje bajo, si se considera que el cáncer de pulmón en los

no fumadores como un cáncer específico sería la séptima causa de muerte por cáncer en todo el mundo (Sun et al., 2007; Torres-Durán et al., 2014). Muchos autores afirman que el cáncer de pulmón en los no fumadores debe ser considerado como una enfermedad diferente de cáncer de pulmón debido al consumo de tabaco (Sun et al., 2007; Durán et al., 2014; Torres-Durán et al., 2014). La exposición a radón en interiores es la segunda causa de cáncer de pulmón después del consumo de tabaco y es el principal factor de riesgo entre los no fumadores (WHO, 2009). Se estima que la exposición al radón podría ocasionar el 30% de las muertes por cáncer de pulmón que ocurrieron en los no fumadores (Pérez-Ríos et al., 2010).

Se establece en 1987, 148 Bq/m³ como el nivel de acción en radón residencial y la Organización Mundial de la Salud ha reducido recientemente los niveles recomendados por debajo de 100 Bq / m³ (WHO, 2009). La recomendación de la OMS se basa en los resultados de los dos estudios más relevantes sobre el radón residencial y el cáncer de pulmón realizados en Europa y América del Norte, respectivamente (Darby et al., 2005; Krewski et al., 2005). Ambos estudios observaron un aumento lineal y estadísticamente significativo del riesgo de cáncer de pulmón con exposición residencial al radón. A pesar de esta evidencia hay escasos estudios sobre radón residencial y cáncer de pulmón realizados exclusivamente en personas no fumadoras.

En un estudio en Suecia se observó un riesgo relativo de 1,44 (IC 95%: 1.0-2.1) para aquellos expuestos a concentraciones mayores de 140 Bq / m³ en comparación con aquellos expuestos a concentraciones inferiores a 50 Bq / m³, es un estudio exclusivo de no fumadores (Sun et al., 2007; Torres-Durán et al., 2014; Lagarde et al., 2001).

Los estudios disponibles sugieren una posible relación entre la exposición a la radiación residencial y el riesgo de cáncer de pulmón en los no fumadores (Sun et al., 2007; Torres-Durán et al., 2014). Algunos estudios no poseen una asociación estadísticamente significativa, pero investigaciones con un mejor diseño y un mayor tamaño muestral apuntan a una asociación entre el radón residencial y el cáncer de

pulmón en los no fumadores. El estudio europeo de pooling ha observado un efecto lineal significativo (Lagarde *et al.*, 2001).

El efecto observado para la exposición al radón analizado en una exposición continua es variable, de 0.77% por cada 100 Bq / m³ a una falta de asociación. Un efecto de 0.77 supondría que las personas expuestas a 200 Bq / m³ tendrían 1.5 más probabilidades de desarrollar el cáncer de pulmón en comparación con una persona no expuesta. Una exposición a 400 Bq / m³ implica mucho mayor riesgo (Durán *et al.*, 2014). El efecto lineal observado para la exposición al radón en los no fumadores en el pooling europeo (Lagarde *et al.*, 2001) sugiere que no hay exposición segura al radón.

La presencia o ausencia de un umbral para la producción de cáncer no se ha establecido y por lo tanto no hay dosis exactas que lo provoquen. Dado que la proporcionalidad dosis-efecto no ha sido demostrada a dosis bajas, la extrapolación de rangos superiores no puede realizarse con ninguna certeza. Parece más probable que dosis muy pequeñas sean proporcionalmente más eficaces que las grandes. Si lo son, la asimilación de un umbral y la extrapolación de revestimientos a partir de dosis altas no subestiman la incidencia de cáncer esperada de pequeñas dosis (Andrews, 1961).

La OMS ha propuesto recientemente reducir los niveles de exposición por debajo de 100 Bq / m³ (WHO, 2009) mientras que en los Estados Unidos el nivel de acción es 148Bq / m³ y en Europa es de 200 Bq / m³ para las casas nuevas.

Las investigaciones realizadas para evaluar la exposición en mineros son diferentes, porque poseen más variables debido a las diferentes condiciones de este subgrupo (exposición a otras sustancias carcinógenas como polvo de sílice, compuestos arsenicales o radiación gamma), la falta de medidas de protección en las cohortes de mineros anteriores y finalmente el hecho de que la concentración de radón en las minas suele ser más alta que la observada en los hogares (Durán *et al.*, 2014).

Las áreas geográficas donde se realizaron los estudios publicados podrían desempeñar un papel importante en los resultados obtenidos. Los realizados en áreas expuestas al radón parecen encontrar un riesgo para la exposición residencial de radón y los realizados en áreas con baja exposición parecen no mostrar ningún efecto. Esta apreciación fue observada por Kreienbrock et al. 2001 en Alemania, quienes establecieron dos áreas diferentes con concentraciones medias de 35 Bq / m³ en un escenario comparado con 73 Bq / m³ en el otro. Estos autores no encontraron asociación en el área con baja exposición (la mayoría de los individuos tenían concentraciones de radón por debajo de 50 Bq / m³) y se encontró un efecto significativo en el área con alta exposición, 0,6 por cada 100 Bq / m³. Otro estudio que reclutó sólo mujeres (Wichmann et al., 2002) tenía concentraciones de radón por debajo de 50 Bq / m³ para los casos y controles, y sólo el 58% de los casos tenían medidas de radón disponibles en comparación con el 84% en los controles.

Debido a las diferencias entre los lugares de trabajo y las viviendas, deben considerarse por separado cuando se trata de evaluar los riesgos radiológicos asociados con la exposición al radón en interiores y de aplicar las reglamentaciones pertinentes.

.Los reglamentos varían mucho entre los países, tanto en lo que respecta a la cobertura de los reglamentos como a los niveles reales de radón incluidos.

La Unión Europea (UE) acepta los niveles de acción recomendados incluidos en la CIPR-65 de entre 500 y 1500 Bq/m³ (ICRP, 1994). Los Estados Unidos utilizan un nivel de referencia de 148 Bq/m³ para viviendas y un nivel de 400 Bq/m³ para lugares de trabajo (USEPA, 2004). En el Reino Unido, el Ejecutivo de Salud y Seguridad (HSE) (Kavasi et al., 2006), ha adoptado un nivel de acción del radón de 400 Bq/ m³ para los lugares de trabajo (Kendall et al., 2005). El nivel de acción para los lugares de trabajo en Hungría es de 1000 Bq/m³. (Kavasi et al., 2006). Israel utiliza un nivel de referencia obligatorio de 200 Bq/m³ para las escuelas y guarderías existentes (Akerblom, 1999). No existen reglamentos específicos en México relativos a los niveles de radón en el interior de los hogares o lugares de trabajo (Espinosa et al., 2009).

Espinosa et al., 2009 realizó un estudio comparando los lugares de trabajo y los hogares, en algunos de los lugares, se encontró que los niveles de radón en interiores en los lugares de trabajo controlados son más bajos que en las casas. Para el área metropolitana el valor medio para el lugar de trabajo fue 28 Bq/m³, y para los hogares 123 Bq/m³ Guadalajara (Jal) 80 Bq/m³ vs 160 Bq/m³; Y para Monterrey (NL) 42 Bq/m³ vs 69 Bq/m³ (utilizando los valores reportados para viviendas en estudios previos en Espinosa y Gammage, 1999).

Se encontró que los niveles de radón son más bajos en los lugares de trabajo cubiertos monitoreados, que en las viviendas medidas. Una razón importante es que mientras los lugares de trabajo monitoreados tienen sistemas de aire acondicionado operando durante las horas de oficina, la mayoría de las casas mexicanas (excluyendo las de las regiones del norte del país) no tienen aire acondicionado. Ochenta y dos por ciento de los lugares de trabajo monitoreados, tienen estilo arquitectónico similar, materiales de construcción y edad de construcción similar, la concentración de radón en interiores es en gran parte debido a la variación en las características geológicas y geográficas de los sitios (Espinosa et al., 2009).

FISIOLOGÍA DEL SISTEMA RESPIRATORIO

Adquirir oxígeno del aire y eliminar el dióxido de carbono de la sangre es un intercambio de gases denominado respiración. Es un proceso rítmico y espontáneo, que se lleva a cabo en los órganos y tejidos del sistema respiratorio. Trabaja en conjunción con el sistema cardiovascular, el cual aporta 5 litros de sangre a los pulmones cada minuto, el sistema respiratorio provee de oxígeno para las células de todo el cuerpo, que producen energía y remueven el dióxido de carbono desechado durante el metabolismo celular (Petechuk, 2004).

En adición a este intercambio de gases, el sistema respiratorio tiene otras funciones, por ejemplo, el tracto respiratorio inicia con las cavidades nasales, que son pequeñas branquias que conectan con el pulmón, éstas poseen células secretoras

de mucosas. Estas células protegen el cuerpo de los contaminantes ambientales (Petechuk, 2004).

El sistema respiratorio también ayuda en la regulación de la temperatura y en el balance ácido-base alcalino de la composición de la sangre.

Existen dos tipos de respiración, respiración del organismo, que es la externa que envuelve a los pulmones y respiración celular, donde se observan las reacciones químicas con las células.

El sistema respiratorio se divide en dos porciones, cada uno con funciones y formas distintas. La porción conductiva está compuesta por estructuras que poseen ductos y caminos, que conectan los pulmones con el resto del ambiente. En esa porción se incluye la cavidad nasal, faringe y laringe. En la porción respiratoria se incluyen los pulmones y estructuras pulmonares donde se facilita el proceso de intercambio de gases. En adición, el sistema respiratorio posee mecanismos de ventilación con varias estructuras y músculos que hacen posible el movimiento de aire dentro y fuera de los pulmones. Los componentes primarios del tracto respiratorio superior son la nariz, la cavidad nasal, faringe y laringe (Figura 1.3).

Los componentes primarios del tracto respiratorio inferior son la tráquea, bronquios, alveolos y pulmones.

La nariz se divide en una porción interna y otra externa. La externa (Figura 1.4) consiste en un almacén de soporte óseo de cartílago hialino cubierto con músculo y piel revestido por una mucosa. En la estructura ósea de la porción externa de la nariz participan los huesos frontales, los huesos nasales y el maxilar. La estructura cartilaginosa consiste en el cartílago septal o del tabique nasal que forma la porción anterior del tabique nasal; los cartílagos nasales laterales inferiores con respecto a los huesos nasales y los cartílagos alares que representan una porción de las paredes de las fosas nasales. Como está compuesto por cartílago hialino, el soporte cartilaginoso de la porción externa de la nariz externa es flexible.

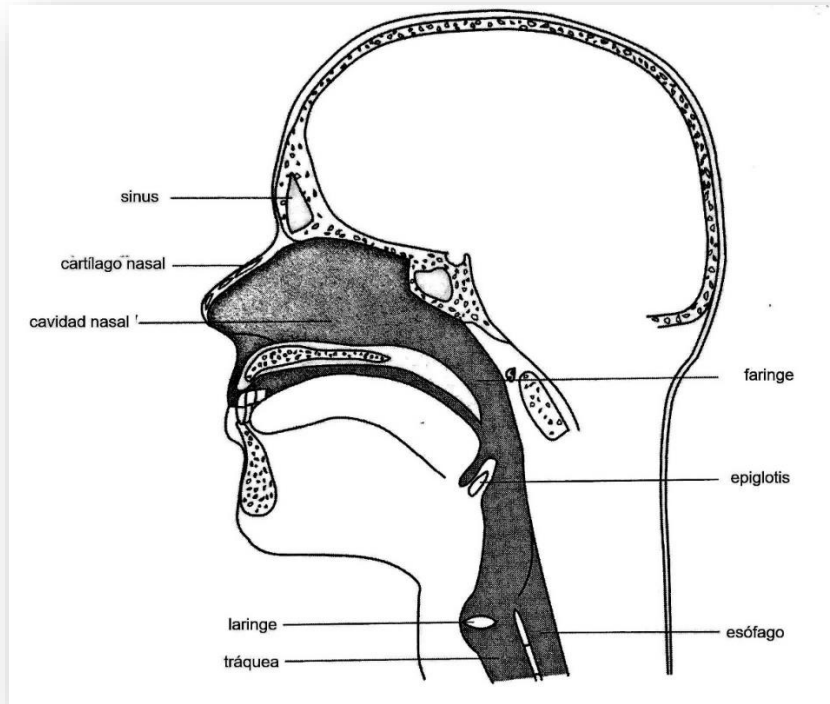


Figura 1. 3 Tracto respiratorio superior (Petechuk, 2004).

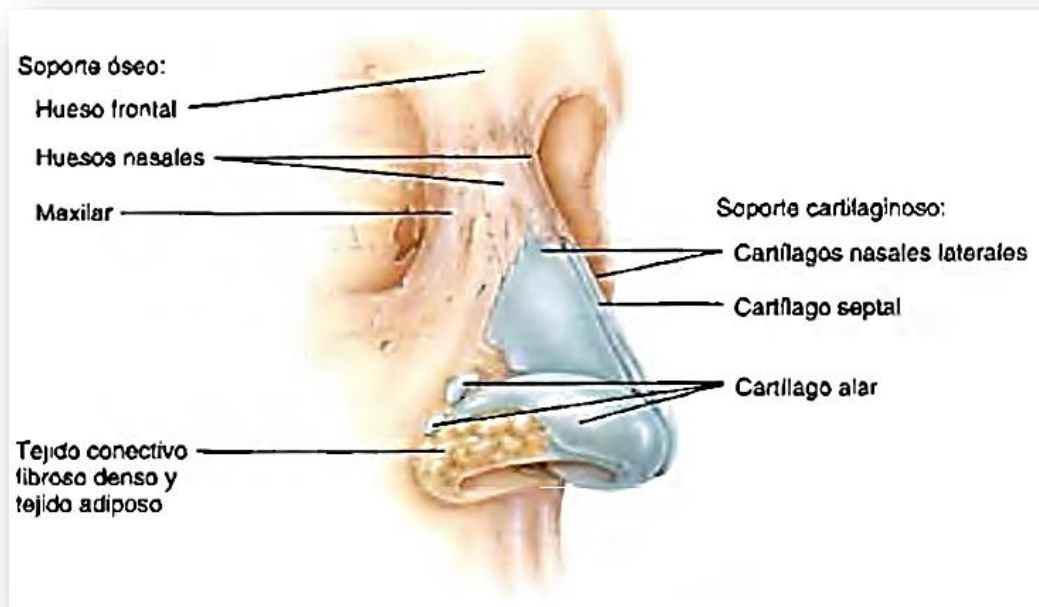


Figura 1. 4 Vista antero lateral de la porción externa de la nariz que muestra sus estructuras cartilagosas y óseas (Tortora y Derrickson, 2006).

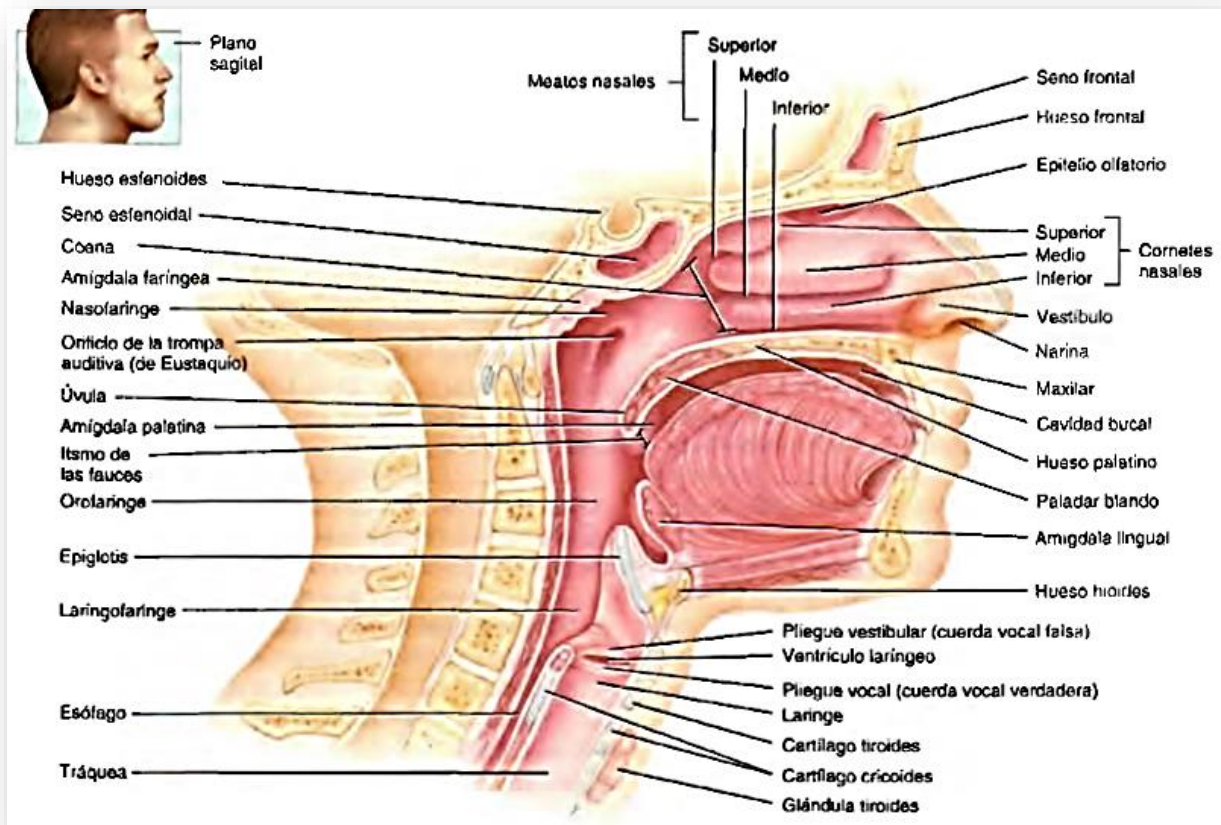


Figura 1. 5 Corte sagital del lado izquierdo de la cabeza y cuello que muestra la localización de las estructuras respiratorias (Tortora y Derrickson, 2006).

En la parte inferior de la nariz externa hay dos aberturas llamadas narinas u orificios nasales. Las estructuras internas de la nariz externa tienen tres funciones 1) calentamiento, humectación y filtración del aire inhalado, 2) detección del estímulo olfatorio y 3) modificación de las vibraciones vocales a medida que pasan a través de las largas cámaras huecas de resonancia. La resonancia se refiere a la prolongación, amplificación o modificación de un sonido mediante la vibración (Tortora y Derrickson, 2006).

La nariz interna (Figura 1.5) es una gran cavidad en la parte anterior del cráneo que se dispone en posición inferior con respecto al hueso nasal y superior en relación con la boca: está cubierta por músculo y por mucosa. En su parte anterior, la nariz

interna emerge con la nariz externa y en su parte posterior se comunica con la faringe a través de dos aberturas llamadas coanas. Los conductos de los senos paranasales y los conductos nasolagrimales también se abren en la nariz interna. Los senos paranasales son cavidades en ciertos huesos craneales y faciales cubiertos por mucosa que se continúan con el revestimiento de la cavidad nasal. Los huesos del cráneo que contienen senos paranasales son el frontal, el esfenoides, el etmoides y el maxilar. Además de producción de moco, los senos paranasales sirven de cámaras de resonancia para el sonido cuando hablamos o cantamos. Las paredes laterales de la nariz interna están formadas por el eimoides, el maxilar, el lagrimal, el palatino y los cornetes nasales inferiores (Tortora y Derrickson, 2006).

La nariz y los conductos nasales sirven al cuerpo como acondicionadores de aire, porque sus membranas mucosas calientan y humedecen el aire antes de que entre al sistema respiratorio bajo. Esta función esencialmente es para ayudar a prevenir el daño a las otras estructuras que son más frágiles.

La faringe es el tracto en forma de embudo que conecta la nariz y la boca con el tracto del sistema respiratorio y el sistema digestivo. Mientras la comida pasa por la faringe hacia el esófago y el estómago, el aire pasa por la nariz y la faringe hacia la laringe y la tráquea, las cuales conectan con el pulmón (Petechuk, 2004).

La laringe está compuesta de hueso, cartílago y músculo, es una estructura similar a una válvula que separa la tráquea del tracto del sistema respiratorio superior y conecta la faringe con la tráquea. Incluye el largo cartílago tiroideo y posee una protuberancia frontal comúnmente llamada la manzana de Adán.

La tráquea es una estructura parecida a un tubo estabilizada con 15 a 20 piezas C-conformadas de cartílago. Mide de 10 a 12 cm de largo con 2.5 cm de diámetro. Es el pasaje primario del aire a los pulmones, contiene mocos producidos por su epitelio que se encargan de atrapar partículas. Los cilios presentes avientan las partículas hacia arriba de la laringe para exhalarlos. La parte más baja entra a los pulmones.

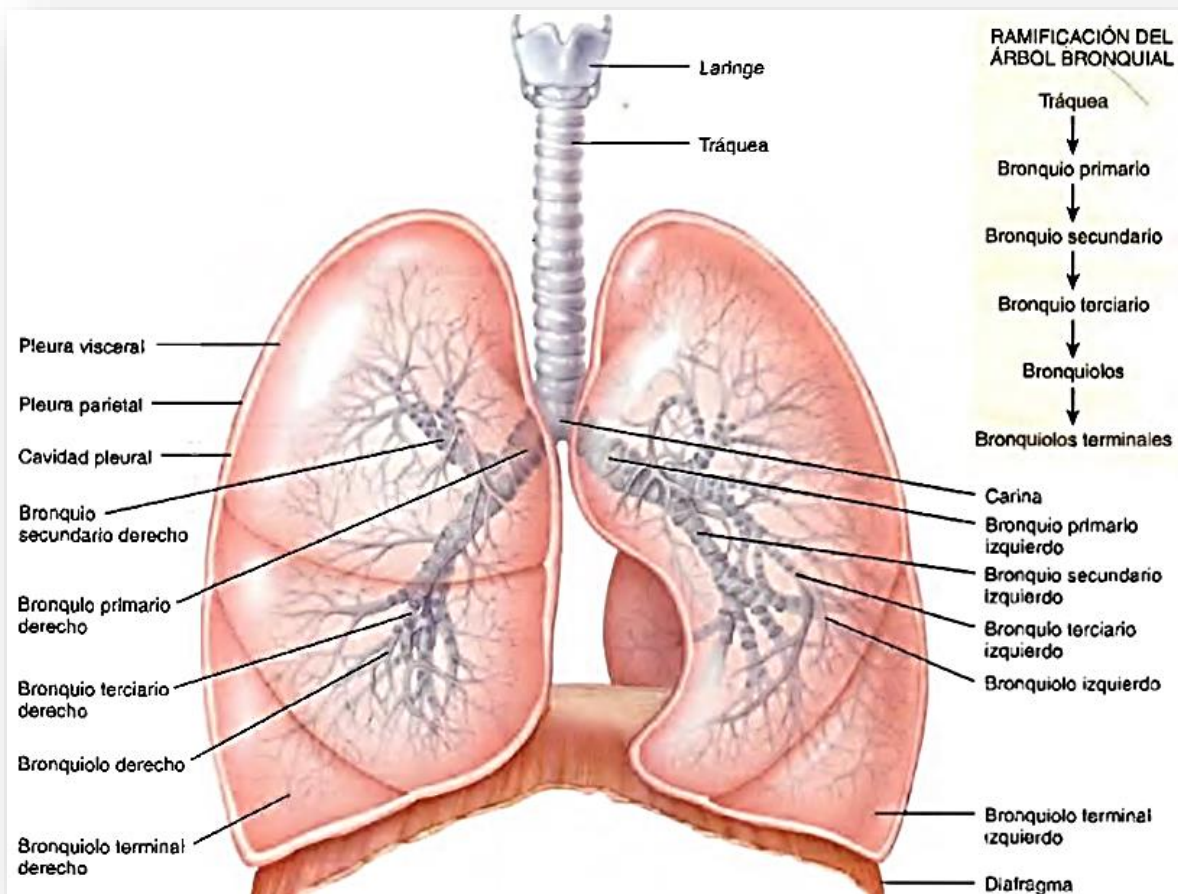


Figura 1. 6 Ramificación de las vías aéreas desde la tráquea: el árbol bronquial (Tortora y Derrickson, 2006).

Los bronquios y bronquiolos son similares a la tráquea, en que ellos tienen un epitelio revestido con cartílago conformado. A medida que éstos penetran más profundamente en los pulmones, el revestimiento epitelial cambia de cúbico simple a pavimentoso simple.

El complejo sistema de bronquios y bronquias en todo el pulmón se llama árbol bronquial, Figura 1.6, el cual se extiende con sus bronquias, cada vez con menos cartílago y el músculo más suave. Cada segmento broncopulmonar tiene muchos compartimientos llamados lobulillos Figura 1.7, cada uno está envuelto en tejido

conectivo elástico y contiene un vaso linfático, una arteriola, una vénula y una rama de un bronquiolo terminal.

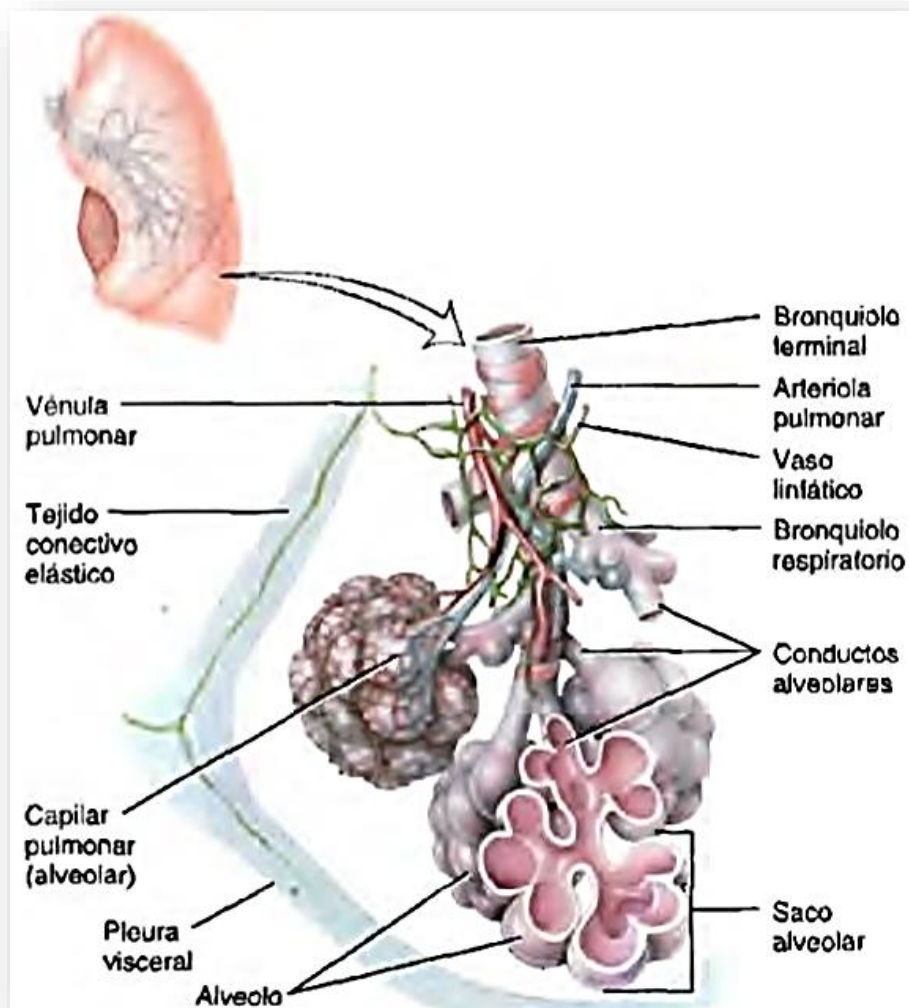


Figura 1. 7 Diagrama de una porción de un lobulillo pulmonar (Tortora y Derrickson, 2006).

La porción final del sistema respiratorio conductivo, los bronquios primarios derecho e izquierdo, se va incrementando en bronquios secundarios y terciarios, con 1 mm de diámetro. Éstos últimos difieren en su constitución de los primarios, porque poseen como soporte pequeñas placas de cartílago que cubren sus paredes.

Las últimas prolongaciones se llaman bronquiolos, miden aproximadamente 0.5 mm de diámetro. La división lleva a los bronquiolos terminales y entonces a los bronquiolos respiratorios (Tortora y Derrickson, 2006).

Los bronquiolos continúan dividiéndose y el número de alveolos se incrementa. Los pulmones humanos poseen aproximadamente 600 millones de alveolos (300 millones por pulmón) creando una superficie respiratoria de 70 m². Cada alveolo mide de 0.1 a 0.2 mm de diámetro. Parecen pelotas diminutas, el alveolo se infla y se desinfla (Petechuk, 2004).

Las vías aéreas desde la tráquea hasta los conductos alveolares presentan alrededor de 25 órdenes de ramificación: la ramificación de la tráquea en los bronquios primarios se llaman ramificación de primer orden: la de los bronquios primarios en bronquios secundarios se llama ramificación de segundo orden y así sucesivamente hasta los conductos alveolares.

Estos diminutos tubos, que además dividen para formar los ductos alveolares, van a terminar en sacos de aire denominados alveolos, son consideradas las primeras estructuras que inician la porción respiratoria.

Los bronquiolos respiratorios terminan en pequeños racimos de alveolos, donde el intercambio gaseoso entre oxígeno y dióxido de carbono toma lugar.

Un alveolo es una celdilla con forma de copa recubierta por epitelio pavimentoso simple y sostenida por una membrana basal elástica fina, el saco alveolar consiste en dos o más alveolos que comparten una abertura común (Figura 1.8). Las paredes de los alveolos son delgadas unicelulares, tienen dos tipos de células epiteliales alveolares escamosas. Las más numerosas son las células alveolares de tipo I, células epiteliales pavimentosas simples que forman un revestimiento continuo a la pared alveolar y células alveolares de tipo II o células septales, que están cubiertas por una extensa red de capilares finos. Cada alveolo está rodeado por alrededor de 2000 segmentos de capilares, que tienen una sola capa de paredes celulares endoteliales (Petechuk, 2004; Tortora y Derrickson, 2006).

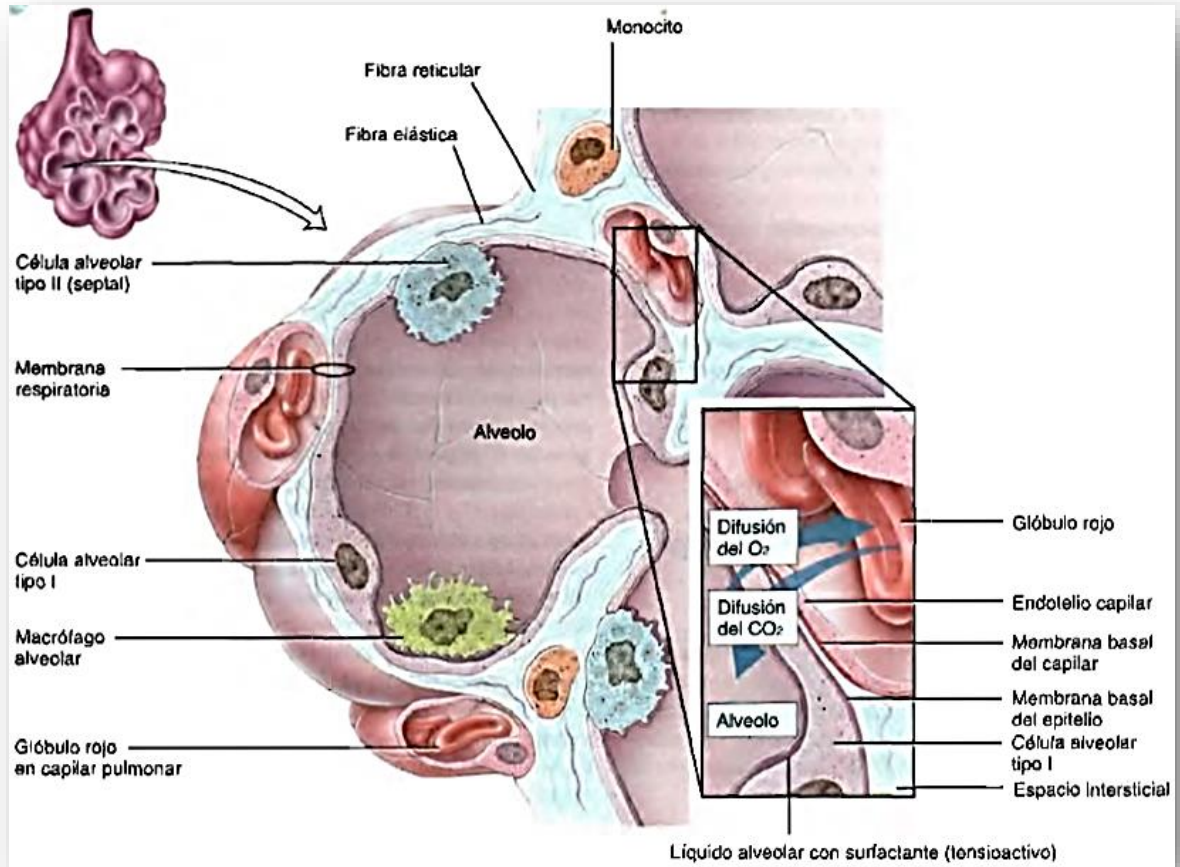


Figura 1. 8 Componentes celulares de un alveolo y detalles de la membrana respiratoria (Tortora y Derrickson, 2006).

El intercambio de O_2 y CO_2 entre los espacios aéreos en los pulmones y la sangre tiene lugar por difusión a través de las paredes alveolares y capilares, juntas forman la membrana respiratoria. Que se extiende desde el espacio aéreo alveolar al plasma sanguíneo, la membrana respiratoria consta de cuatro capas: Una Capa de células alveolares de tipo I y tipo II junto con macrófagos alveolares asociados que constituyen la pared alveolar, membrana basal epitelial, membrana basal capilar y endotelio capilar (Tortora y Derrickson, 2006).

El intercambio gaseoso se produce por difusión (movimiento neto de partículas de una región de mayor concentración a una región de menor concentración) en el cual el oxígeno molecular se apropia de un medio fluido externo y se canaliza a las

células del tejido para la producción de energía, entre las paredes delgadas de los alvéolos y los capilares (Figura 1.8 y Figura 1.9). El proceso implica el paso del oxígeno de los alvéolos a los capilares para su distribución en todo el cuerpo. La barrera de sangre-gas, o membrana respiratoria, tiene un espesor de aproximadamente la mitad de un micrómetro (Maina, 2002).

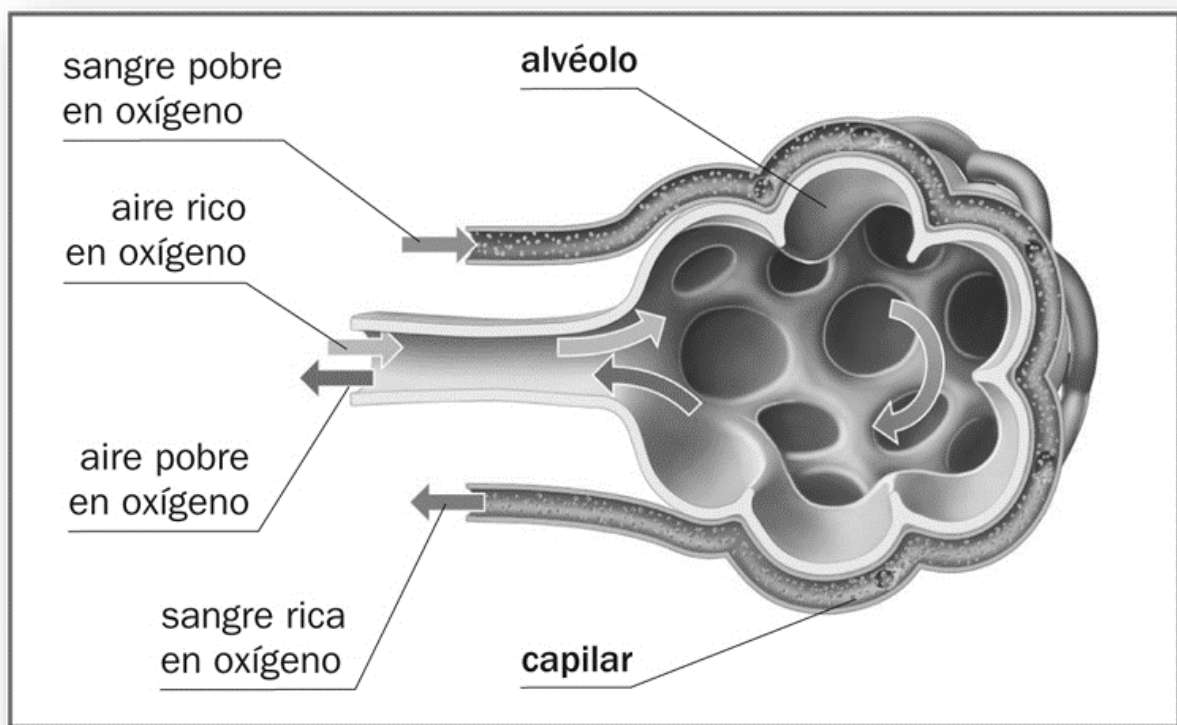


Figura 1. 9 Intercambio gaseoso (Petechuk, 2004).

Juntos, los procesos biomecánicos fisiológicos y de comportamiento participan en la toma de una muestra del medio respiratorio externo disponible para un organismo del cual se extrae oxígeno molecular y se anula el dióxido de carbono en él. La respiración externa implica el movimiento de dos vectoriales: afluencia y efluencia de oxígeno y dióxido de carbono, respectivamente. A través de la convección y la

difusión, el oxígeno es entregado a las células del tejido a través y el ensamblaje de los compartimentos del tejido (Maina, 2002).

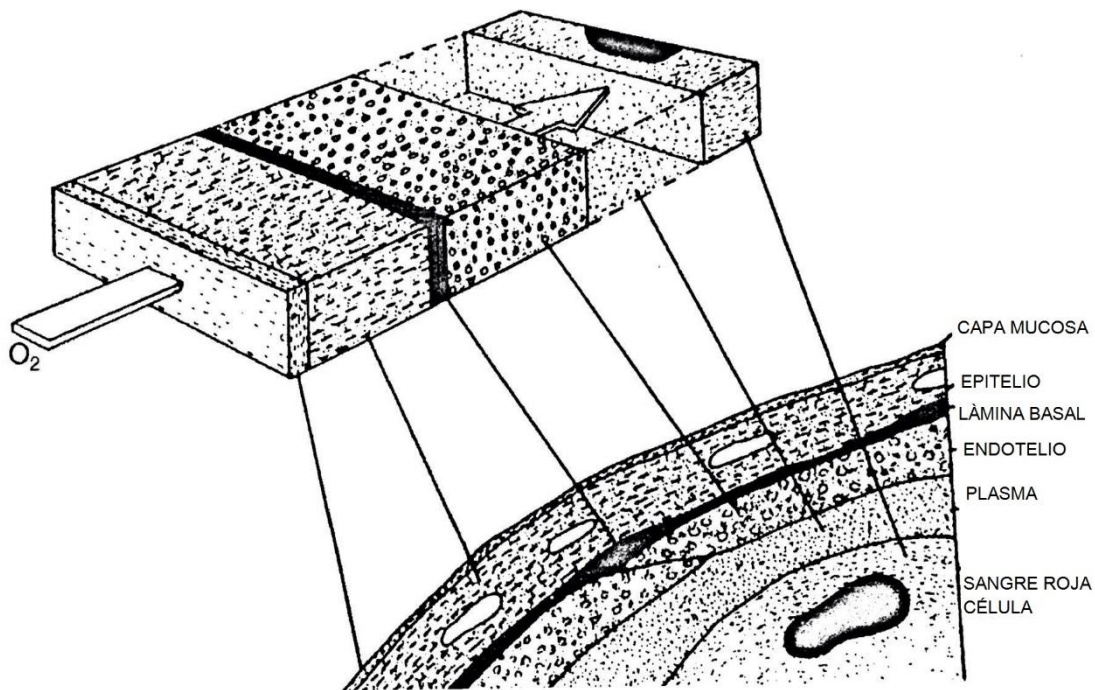


Figura 1. 10 Componentes estructurales de la barrera agua-sangre (Petechuk, 2004).

En la figura 1.10 se puede observar a forma de esquema la base de un intercambiador de gas. Un medio de fluido respiratorio externo está separado del interno por una delgada barrera tisular compuesta. Un gradiente de presión parcial que prevalece entre los dos medios impulsa el oxígeno del medio externo a través de la barrera a la sangre. El dibujo adjunto ilustra los componentes estructurales de la barrera agua-sangre (tejidos).

Un fluido llamado surfactante es producido por neumocitos de tipo II (células especializadas que alinean los alvéolos) y secretados en los alvéolos para recubrir las paredes y reducir la tensión superficial o la rigidez. La reducción de la tensión superficial provoca que se necesite menos presión para inflar los alvéolos, lo que es especialmente importante para el nacimiento. El tensoactivo que alinea los alvéolos también proporciona la superficie húmeda necesaria para el intercambio de gases, porque el gas debe disolverse en el líquido antes de moverse a través de

las células. Como sustancia, el surfactante tiene una vida media de 14 a 28 horas, lo que significa que se degrada muy rápidamente y debe ser continuamente producido por los neumocitos.

Cada pulmón está envuelto por una membrana transparente llamada pleura que tiene una membrana externa (pleura parietal) unida a la pared torácica y una membrana interna (pleura visceral) que cubre los pulmones. Entre las membranas pleurales externas e internas, que en realidad son una membrana continua que se dobla hacia atrás para cubrir tanto el tórax como los pulmones, hay un espacio llamado cavidad pleural. Dentro de esta cavidad está el líquido pleural, que ayuda a reducir la fricción entre las membranas durante la respiración cuando los pulmones se expanden y se contraen y también ayuda a sostener ambas capas pleurales en su lugar, al igual que dos diapositivas microscópicas que están húmedas y pegadas. El líquido pleural está compuesto por proteínas (40.97 g/L; n=638, proteína de suero (70.58 g/L n= 364), albúmina de suero (38.35 g/L; n= 384) glucosa (3.84 mmol/L; n=627), hemoglobina (133.78 g/L; n= 480) y linfocitos ($1.28 \times 10^9 / L$; n=457), posee un pH de 7.34; n= 570. (Rajesh et al., 2016).

Los pulmones también están cubiertos por la caja torácica, que proporciona protección contra traumatismos externos. Entre los pulmones derecho e izquierdo hay un área llamada mediastino, que contiene el corazón, la tráquea, el esófago, el timo y los ganglios linfáticos. El corazón separa los pulmones derecho e izquierdo, y el tamaño más pequeño del pulmón izquierdo incluye una "muesca cardiaca" para proporcionar espacio para que el corazón se extienda hacia dentro.

QUELATOS

Los compuestos de quelato fueron conocidos en el siglo pasado, pero primero fueron dados este nombre por Morgan y Drew, trabajando en la Universidad de Birmingham, hace poco más de medio siglo. El quelato del griego *chele*, pinza de cangrejo, es un anillo heterocíclico formado por un complejo metálico el cual generalmente ocupa la posición central y ligandos orgánicos (agentes quelantes)

asociados al metal (Herbello Hermelo, 2007). Morgan y sus colegas hicieron los primeros estudios verdaderamente sistemáticos de esta clase de compuesto, pero estaban principalmente interesados en las β -diquetonas. Recientemente, se tuvo ocasión de analizar algunos de los especímenes originales y encontró su pureza intacta después de más de 50 años. La primera aplicación conocida de una reacción quelante en el análisis químico fue descrita por Plinio en el primer siglo. El sulfato ferroso, utilizado como adulterante en el sulfato de cobre, fue identificado por la mancha azul-negra que produjo en el papiro empapado en un extracto de tuercas de la tuerca (Belcher, 1973).

La primera aplicación de un reactivo quelante sintético se debió a Ilinski y von Knorre en 1885, que utilizaron 1-nitroso-2-naftol para la precipitación selectiva de cobalto. Otros reactivos pronto iban a seguir. Algunos compuestos se conocían mucho antes de que se hubieran realizado sus posibilidades como reactivos en el análisis químico (Belcher, 1973).

Se utiliza para secuestrar iones metálicos. Son utilizados para aportar metales, en situaciones como fertilizantes, medios de cultivo, medios nutritivos, envenenamiento, etc. El agente quelante libre puede enmascarar la toxicidad de los metales pesados de manera considerable, sin embargo la ausencia de los metales puede limitar el crecimiento del medio cultivo que se busca.

Se utilizan agentes quelantes derivados de productos orgánicos, por ejemplo EDTA.

Muchos agentes quelantes orgánicos son ácidos débiles que reaccionan con iones metálicos para formar complejos neutros, que son muy solubles en disolventes orgánicos, como éteres, hidrocarburos, cetonas y especies cloradas (cloroformo y tetracloruro de carbono). Se utilizan como procedimientos de extracción de iones metálicos, para aislar cantidades de traza. Porque una vez formados los quelatos, muchos cationes se pueden extraer desde medios acuosos a disolventes orgánicos (Skoog et al., 1996).

BIOPOLIMEROS

Polímero viene del griego poli mucho y mero partes. Cuando son de origen natural se les denominan biopolímero y cuando son sintéticos solo polímeros.

La diferencia entre éstos se encuentra principalmente en las fuerzas intermoleculares e intramoleculares y por los grupos funcionales presentes (Seymour and Carraher, 1995).

Los biopolímeros alimenticios como la gelatina, caseína, proteína de haba, goma xantata, goma acacia se utilizan en la industria veterinaria como agentes quelantes de cationes como el magnesio, además de formar una barrera visco elástica en la película.

La grenetina es un biopolímero animal, coloide gel; incoloro, traslúcido, quebradizo, insípido, compuesto en un 80% de proteína derivada de colágeno animal, obtenido durante la cocción de huesos, pieles y cartílagos, se disuelve en agua para dar lugar a gelatina orgánica de bajo costo (Navarro, 2000).

Se le considera en concentraciones menores como un objeto viscoelástico, cuando se le aplica una tensión pequeña y constante, se deforma. Primero se observa un salto elástico inicial, le sigue el intento de fluir como fluido viscoso, pero se retarda porque posee características sólidas, con el paso del tiempo alcanza el equilibrio, porque predomina el flujo viscoso, ya que es un sistema ostensiblemente líquido (Aulton, 2014).

MÉTODOS DE DETECCIÓN DE ^{222}Rn

Existen diversos métodos de detección de radiación ionizante, se dividen en pasivos y activos.

DETECTORES PASIVOS

Los detectores de trazas nucleares NTD (Nuclear Track Detector), se aplican actualmente en diversos campos como son: Física Nuclear, física espacial, estudio de meteoritos y muestras lunares, rayos cósmicos, aceleradores de partículas, metalurgia, geología y arqueología, medicina y biología entre otros.

Los detectores de plástico de trazas es un método ampliamente usado para medir radón tanto en casas como en campo, en todo el mundo. Son detectores de plástico pequeños (típicamente de 2 cm x 1.0 cm aprox. Y espesores entre 100 y 50 μm); fáciles de usar con un procedimiento simple de lectura. En el presente trabajo los detectores de trazas nucleares (NTD) son la herramienta principal para la detección del radón.

Los NTD muestran diferentes sensibilidad entre 0.5 y 10 MeV, algunos son en particular sensibles al rango de energía de las partículas alfa que son la emitidas por el radón. Estos detectores inicialmente estaban hechos de celulosa (nitrato y acetato), actualmente se emplean policarbonatos, un policarbonato como el CR-39. Los SSNTD son insensibles a rayos beta y gamma, en otras palabras los rayo β y γ no producen trazas (Gallardo, Jiménez y Solazar, 1986; Fleischer, Price y Walker, 1965).

Los SSNTD también tienen una ventaja al no verse afectados por la humedad, bajas temperaturas, moderado calentamiento y luz, estos detectores presentan características únicas para mediciones de radón intramuros de larga integración (Tommasino, 1979) de detección del ^{222}Rn .

Los detectores de trazas en sólidos pueden ser de diversos materiales, se dividen en inorgánicos y en orgánicos (resultando más eficientes los segundos).

Los inorgánicos estudiados son: la Mica (moscovita) (Price y Walker, 1962), Cuarzo (SiO_2), Obsidiana (volcánica), Vidrio de silicio Soda Lime Glass (vidrio portaobjetos), Rubí ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{CrO}_3$), Zafiro ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{TiFeO}_3$), Apatita ($\text{Ca}(\text{CaF})(\text{PO}_4)_3$), Olivino ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Mg}_2$) (Gallardo, Jiménez y Solazar, 1986).

Los materiales orgánicos son: Acetato de celulosa (Kodacel, Triafol), Nitrato de celulosa (Daicel), Butirato de celulosa (Triafol B), Triacetato de celulosa (Kodacel TA401, Triafol TN), Cormofenol (Fenoplastic), Policarbonatos (Lexano, Makrofol, Kimfol), Policarbonato (CR-39), Nitrato De celulosa (LR-115).

Los detectores de trazas en sólidos pasivos más comunes son vidrios (soda lime glass), lexano, y CR-39 (Espinosa, 1994).

Los primeros materiales de detección, para observar fragmentos de fisión, fueron los vidrios portaobjetos (soda lime glass) (Raya, 1985; Segovia, 1978; Espinosa, 1994). Utilizaban como revelador ácido fluorhídrico al 4%.

El lexano se descubrió en los 60's, es un polímero. La empresa Bayer lo nombró Macrofoil.

El CR-39 surgió en los 80's, era utilizado en la industria de la óptica y la aeronáutica, detecta partículas alfa con una amplia respuesta a la energía. Es el material más usado como detector. Es el material que mejor satisface los requisitos de uniformidad en espesor, reproducibilidad de respuesta, fácil manejo, bajo fondo de trazas, alta sensibilidad. En la actualidad existen cinco compañías que producen este material para fines de investigación, las cuales son: Pershore Moulding Limited, American Acrylics and Plastic Inc., Fukuvi Chemical Ind. Co. LTD, Dataqua System, Universidad de Bristol.

Metodología de la traza Nuclear,NTM por sus siglas en inglés, es la técnica de medición más útil para mediciones de radón en interiores a gran escala (Khan et al., 1989). Se utilizó un sistema pasivo de copa de cierre cerrado, con el CR-39 (Lantrack) como material detector (Espinosa y Gammage, 1993). Se llevó a cabo un ataque químico en una etapa en una solución de KOH 6,25 M a 60°C , con un tiempo de grabado de 18 h. Este proceso está bien establecido y altamente

confiable. El sistema de detección se calibra anualmente en las instalaciones de radón ORNL (EE.UU.). El factor de calibración se verifica sistemáticamente y se verifica cada seis meses y / o cuando se utiliza una nueva hoja de detectores en la cámara de radón de IFUNAM. Los detectores fueron leídos automáticamente por un Sistema Digital de Análisis de Imágenes (DIAS) (Gammage y Espinosa, 1997) y los datos se analizaron automáticamente utilizando un PC con el software Microsoft Excel. Los métodos y procedimientos utilizados para realizar mediciones a gran escala de los niveles de radón en casas y otras viviendas se aplicaron aquí para las mediciones de los niveles de radón en lugares de trabajo en interiores

En México se usa CR-39 o policarbonato en la industria de la óptica, pero no reúne las características para su uso en la investigación.

La metodología que se sigue para el uso del CR-39 consiste en: 1.- Exposición a la radiación ionizante 2.- Revelado químico de la traza 3.- Caracterización y lectura de la traza.

La principal característica de los DTS es que sólo son sensibles a partículas alfa, protones, iones pesados y fragmentos de fisión. Son incapaces de percibir partículas beta, radiación gamma y rayos X. Esto es una ventaja cuando se realizan mediciones en campos de radiación mixtos.

Se han expuesto materiales detectores como el CR-39 (Allyldiglicol policarbonato) a campos de Mega-Roentgens de explosión gama y no afecta la medición (Espinosa et al. 1987; Espinosa, 1994).

El material detector de radiación ionizante se expone para poder realizar mediciones ambientales (con radiación natural) o para realizar mediciones específicas para efectos de calibración, evaluación de parámetros, medición de contaminantes y en general medición de partículas.

Cuando se expone el material detector a la radiación se “forma/crea” una traza nuclear en el material y permanece latente por cientos o miles de años, hasta que esa traza es revelada mediante un ataque químico, Figuras 1.11 y 1.12, (Espinosa, 1994).

Al momento de revelar, el material es sometido a un ataque químico de desgaste superficial, presentándose un ataque preferencial en las zonas donde incidió la radiación ionizante, se forma un “cono” al cual se le suele llamar traza grabada, a lo largo de la trayectoria de la partícula incidente (Espinosa, 1994).

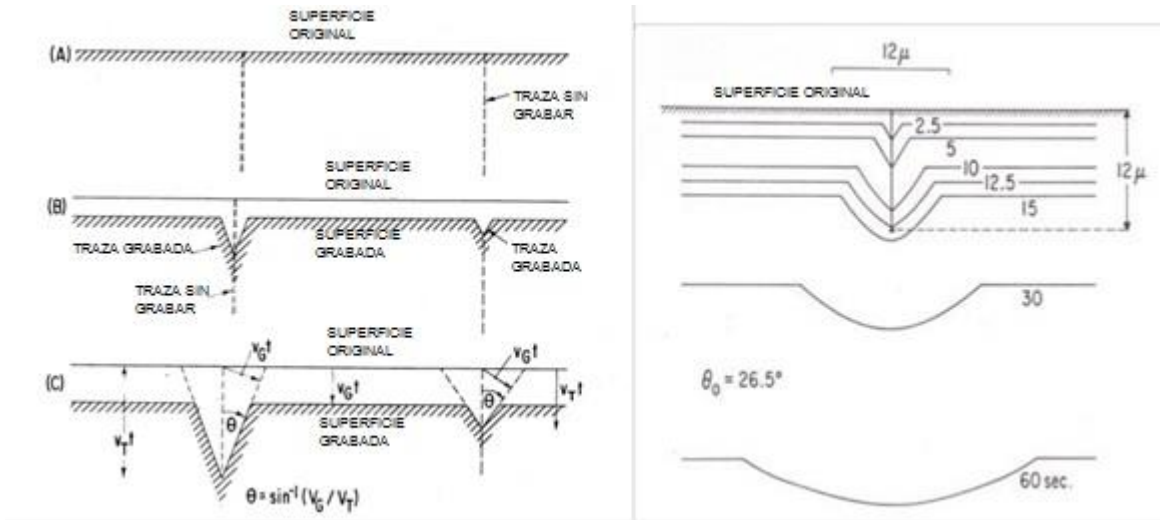
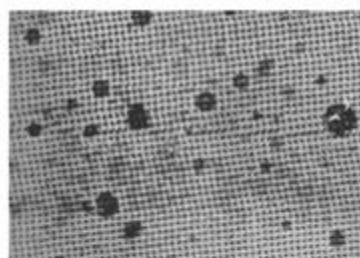


Figura 1. 11 Grabado de trazas (Fisica.unam.mx. 2015).

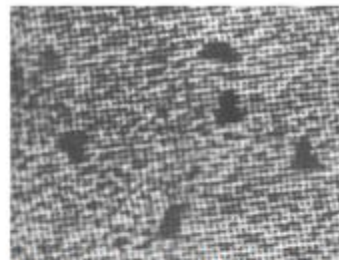
Para el proceso de revelado se deben conocer las características del material detector, tipo de solución química de grabado y concentración, temperatura de la solución de grabado y tiempo de permanencia en la solución. A este proceso se le llama grabado químico.

Al finalizar el revelado químico, se obtiene una traza o huella de la radiación recibida, se debe leer a nivel microscópico (figura 1.11). Si se cuentan las trazas por unidad de área, nos dará una relación del número de partículas incidentes y del tamaño del diámetro de la traza, nos indicará la energía de la partícula.

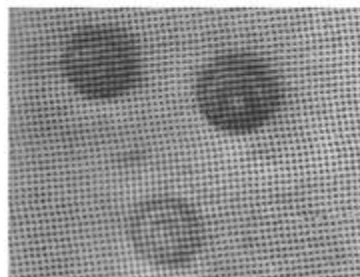
Para la lectura de las trazas, se pueden tener gran diversidad de sistemas, algunos simples, como el utilizar una cámara de video asociada a un microscopio óptico y amplificar la señal en un monitor de televisión, otros más complejos basados en densitometría, otros en medición de imágenes y actualmente los más avanzados por medio de digitalización de imágenes. En general, se puede considerar un proceso generacional en los sistemas de análisis y conteo (Espinosa y Gammage, 1993; Espinosa, 1994).



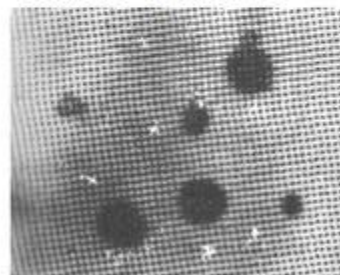
Neutrones en CR-39



Partículas Alfa en
nitrato celulosa



Partículas Alfa en
acetatocelulosa



Partículas Alfa en
CR-39

Figura 1. 12 Trazas nucleares en polímeros (Espinosa, 1994).

DETECTORES ACTIVOS

RAD7 Detector de radón, es un detector electrónico de radón con monitorización en tiempo real y análisis espectral. Sus especificaciones coinciden o superan las de los dispositivos de medición de radón más caros del mundo. Al mismo tiempo, incorpora una serie de características exclusivas que se encuentran en ningún otro detector de radón, independientemente del precio. Increíblemente, el RAD7 es asequible.

El RAD7 es un sofisticado instrumento de medición ampliamente utilizado en laboratorios y trabajos de investigación en todo el mundo, por probadores de radón, mitigadores e inspectores de viviendas, en minas y desiertos, en el océano y hasta volcanes, a temperaturas extremas.

El RAD7 es también el detector electrónico más sencillo que se utiliza en la computadora, con configuraciones pre-programadas para tareas comunes. Está construido para soportar el uso diario en el campo. Un estuche robusto y atractivo encierra el detector, que es autónomo y autosuficiente. El RAD7 viene completo, con una bomba de aire incorporada, baterías recargables y una impresora infrarroja inalámbrica. La impresora puede dejarse en su oficina o en su automóvil, cuando lo desee, y el detector recopilará datos y lo guardará para su posterior impresión o descarga en un PC.

El RAD7 es un Sniffer que usa la desintegración alfa de 3 minutos de una hija de radón, sin interferencia de otras radiaciones, y la desintegración alfa instantánea de una hija de torón. El RAD7 olfatea los puntos de entrada y el radón gushers y se recupera en minutos de altas exposiciones al radón. El RAD7 es también un Monitor Continuo que mide el nivel de acción EPA de 4 pCi / L, con una desviación estándar del 10%, en menos de dos horas. Al final de cada ejecución, el detector imprime un informe completo.

El microordenador posee configuraciones programadas para pruebas de uso frecuente, el conteo audible de radón y torón permite escuchar los puntos calientes. El comando de bloqueo de llaves a prueba de manipulaciones asegura el RAD7 y asegura pruebas ininterrumpidas. Es fácilmente portátil: El RAD7 pesa 9,6 libras (4,35 kg) además de que muestra, imprime y descarga datos de radón en su elección de unidades; posee inmunidad a la acumulación de 210pb. Incluye impresora inalámbrica y enlace de datos de infrarrojos para impresiones in situ.

El RAD7 es muy fácil de usar, figura 1.13. Está listo para funcionar desde el momento en que se enciende. Lo primero que se ve es la revisión de configuración, que muestra la configuración actual. Esto le permite comprobar que la máquina está configurada.

La máquina está preajustada para una prueba de 1 ó 2 días, o se puede preestablecer para su trabajo en particular ese día. Cuando se llegue al sitio, simplemente con presionar los botones y la prueba se ejecutará automáticamente.

Una característica exclusiva de RAD7 es el modo "Auto". Esto inicia una prueba en modo Sniff para una respuesta rápida, una lectura de línea base. Después de 3 horas cambia automáticamente al modo "Normal" para el resto de la prueba, asegurando la precisión estadística (DurrIDGE.com, 2017). Muestra un espectro de energía Alfa (Figura 1.14).



Figura 1. 13 Detector electrónico de Radón RAD7 (durrIDGE.com, 2017).

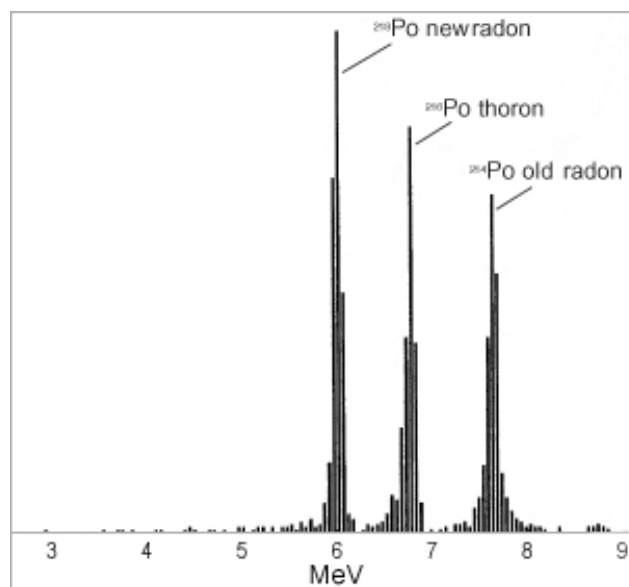


Figura 1. 14 Espectro de energía Alfa (durrIDGE.com, 2017).

EDA RDA 200, es un cintilómetro de partículas alfa, esto significa que mide la actividad utilizando el centelleo a través de una celda. Esta celda está recubierta por ZnS(Ag) de manera que cuando esta sustancia recibe un impacto de una partícula alfa, procedente de la desintegración de los isótopos del Rn, se emite un fotón de luz que posteriormente se convertirá en una señal digital, Figura 1.15.



Figura 1. 15 EDA 200

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Durante el proceso de respiración, la inhalación de aire lleva consigo al ^{222}Rn el cual al ser un elemento radiactivo, presenta la desintegración radiactiva, produciendo los radioisótopos como el Po el cual es sólido y por lo tanto puede fijarse en las mucosas del sistema respiratorio, incluyendo a los pulmones, por lo tanto es altamente posible el desarrollo de cáncer en pulmón, garganta y nariz, ya que estos productos de decaimiento continúan su proceso de desintegración emitiendo radiación ionizante que interactúa directamente con las células, siendo posible se multipliquen en forma desordenada dando origen al denominado `cáncer.

Estos efectos se ven más frecuentemente en mineros, sin embargo, debido a las condiciones climáticas y costumbres laborales, este padecimiento se ha expandido a habitantes de casas, oficina y trabajadores de fábricas. Debido al tipo de construcción y al uso de aire acondicionado.

En consecuencia, al diseñar un dosímetro, se busca que sea similar al tejido pulmonar, para responder cuál es la cantidad de trazas nucleares fijadas, y así comprender el efecto del radioisótopo.

JUSTIFICACIÓN

Los mineros son la población con mayor riesgo de presentar cáncer en pulmón, principalmente si laboran en minas subterráneas. Por lo que es importante estudiar la fijación de los radioisótopos en el epitelio pulmonar y mucosas. Dadas las condiciones propias de las actividades mineras, es difícil reproducirlas en laboratorio, por lo que se requiere un monitoreo *in situ* a fin de tener las condiciones fisicoquímicas de trabajo de los mineros expuestos al aire en las minas subterráneas.

El presente trabajo tiene como propósito analizar un quelato análogo al epitelio pulmonar y mucosas de mamíferos, para evaluar los efectos del radón que se pueden presentar en una mina subterránea, en una casa habitación o en algún sitio que pudiera presentar radiación ionizante provocada por el gas radón.

Esta información también puede ser de utilidad para estudios posteriores de efectos de radón en interiores.

Actualmente los métodos tradicionales para detectar α y β -rayos generados a partir de la radiación del radón incluyen la absorción de carbón activado, una pista de detección de etch, electret y sondeo. Sin embargo, estas estrategias están limitadas por varios factores, como el tamaño excesivo y el precio exorbitante del equipo requerido, un período relativamente prolongado de detección y los riesgos para la salud del personal que lleva a cabo los experimentos. El radón es persistente y continúa dañando el cuerpo humano, por lo que existe una necesidad urgente de un nuevo método que simplifique el funcionamiento de la detección de las dosis acumulativas de radón. Lo ideal es obtener un dosímetro que simule el efecto del radón en pulmón. Este método resuelve los problemas anteriores, y puede tener el potencial de aplicación. El dispositivo de muestreo con tamaño pequeño es fácil de transportar.

HIPÓTESIS

La fijación de los radioisótopos, que promueven el cáncer en pulmón, se lleva a cabo en el epitelio pulmonar y en las mucosas. Las condiciones de humedad, presión barométrica y temperatura juegan un papel importante, por lo que la cuantificación de estos radioisótopos mediante un biopolímero que simule el tejido pulmonar ofrecerá condiciones cualitativas con mayor confianza para determinar el posible daño al tejido pulmonar de las personas expuestas al radón.

OBJETIVOS

- Elaborar un biopolímero con propiedades similares al epitelio pulmonar que sirva como un dosímetro “interno” en personal expuesto a ambientes que contengan radón.
- Comparar efecto del ^{222}Rn en el tejido pulmonar de un cerdo con el biopolímero elaborado.
- Determinar el posible daño por radioisótopos en el tejido pulmonar de personas expuestas a radón utilizando el biopolímero.

METODOLOGÍA

El presente trabajo se llevó a cabo de acuerdo a un modelo experimental de diseño propio, se dividió en trabajo de laboratorio, campo y gabinete.

LABORATORIO:

1. Medición del fondo radiactivo correspondiente al ^{222}Rn , mediante el detector dinámico RAD7, esta medición permitió considerar el *background* (señal de fondo) para la cuantificación del ^{222}Rn en el quelato expuesto.
2. Pruebas para la obtención del biopolímero. Para realizar la simulación del epitelio pulmonar y la mucosa del sistema respiratorio, se probó un quelato (grenetina) a diferentes concentraciones y humedad, estas pruebas se realizaron en la cámara sellada de un volumen conocido, que contenía una fuente de ^{222}Rn (mineral de U) y fue expuesto a diferentes tiempos.
3. El efecto del quelato diseñado se comparó con el efecto que se presentó en el tejido de un pulmón de cerdo.
4. Análisis de la respuesta del quelato a la fijación de las partículas alfa (α) emitidas por el decaimiento radiactivo del ^{222}Rn y de sus productos de decaimiento (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi y ^{214}Po) en fase sólida.

El análisis se realiza en el espectrómetro gamma y con ayuda del ICP (Espectrómetro de emisión de plasma acoplado inductivamente), en este último se analizan los contenidos de U en la materia prima empleada.

CAMPO

1. Se visitaron cuatro zonas que presentan mayor emanación de radón.
 - Mina en el municipio Mineral del Chico, del estado de Hidalgo “Socavón del Minero”, Mina de San Antonio, 500 m de profundidad, Coordenadas 20° 13' 14" N 98° 44' 10" O.
 - Unidad Habitacional Pantitlán, Ciudad de México. Coordenadas 19° 42' 90" N 99° 06' 78" O.
 - Aguas termales en el municipio de Chapa de Mota, del Estado de México, “Centro Recreativo las Cascadas”. Coordenadas 19° 45' 41" N 99° 29' 21" O.
 - Aguas termales en el municipio de Tonicato, del Estado de México, “Balneario Municipal Tonicato”. Coordenadas 18° 48' 55" N 99° 40' 5" O.
2. Se colocó el biopolímero desarrollado durante una hora.
3. Se midió ^{222}Rn con los equipos dinámicos RAD7 y EDA200, también se colocará un detector de estado sólido (CR39) el cual tendrá un tiempo de exposición de 30 días.
4. El detector de estado sólido y el biopolímero se analizaron en el laboratorio, se realizó el conteo de las trazas nucleares fijadas en las estructuras.

TRABAJO DE GABINETE

1. Resultados y análisis de resultados. Se llevó a cabo el análisis de los resultados obtenidos y la discusión de los mismos considerando la respuesta de cada uno de los sistemas a la radiación alfa

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el trabajo experimental se realizó un diseño de la metodología.

A continuación en la Figura 2.1

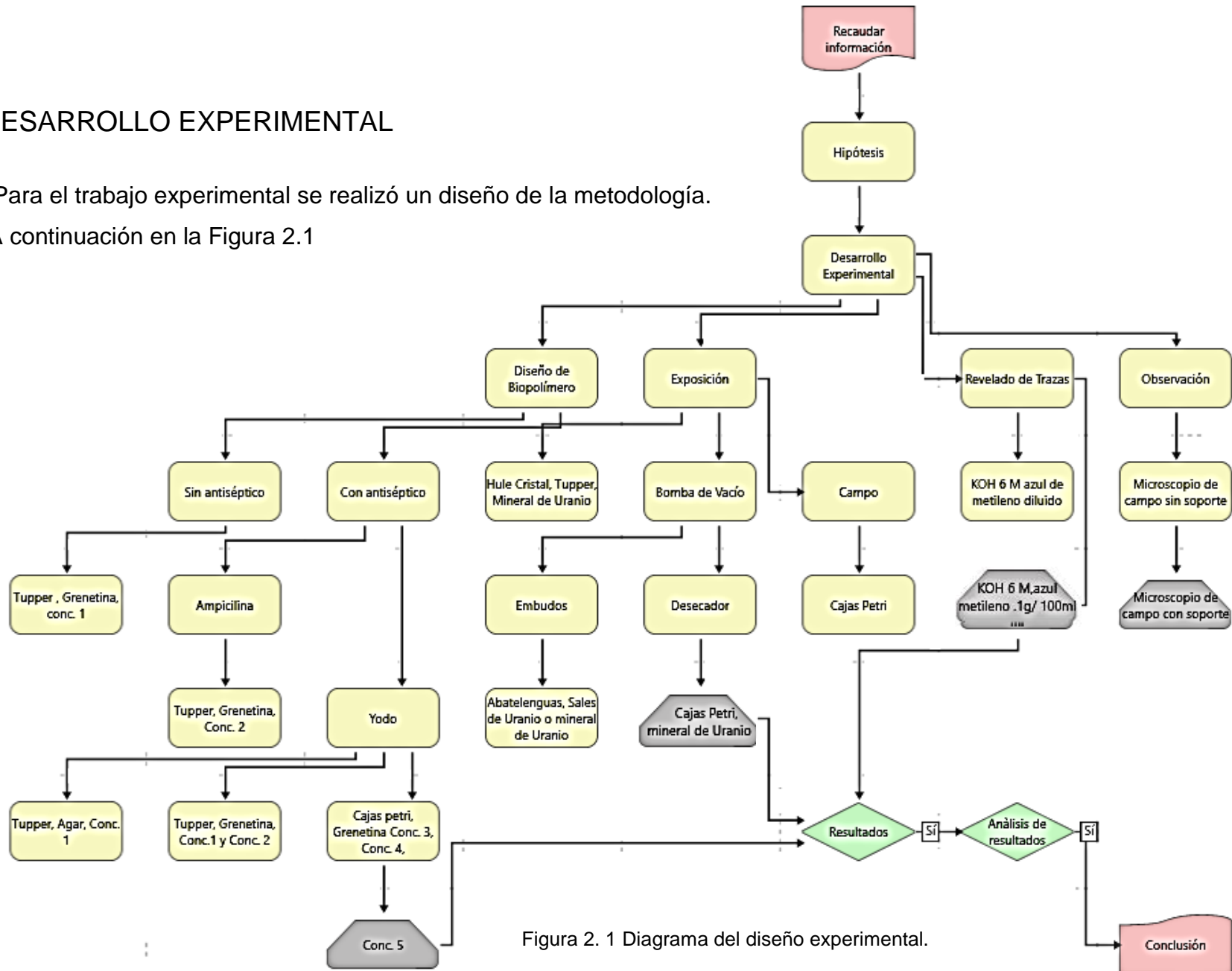


Figura 2. 1 Diagrama del diseño experimental.

Para el diseño experimental se quiere de los siguientes materiales, equipos y reactivos:

Material

- Un Vaso de Precipitado PYREX® 1 L
- Un Vaso de Precipitado PYREX® 500 mL
- Agitador
- Cajas Petri Chicas 60 mm x 15 mm
- Tupper para Sándwich
- Pipeta Pasteur
- Papel cebolla
- Probeta graduada PYREX® 100 mL
- Bisturí de Acero inoxidable grado quirúrgico
- Hielera
- Cinta adhesiva
- Ligas
- vasos de plástico
- placas de CR39
- bolsas de plástico
- encendedor
- Silicón
- clips
- Tupper para sándwich
- Hule cristal
- Embudo de separación 500 mL
- Embudo de separación 1 L
- Abatelenguas de Madera
- Vidrio de reloj
- Tubos de ensayo
- Mangueras para vacío

- Placa para Desecador de Acrílico 23 mm
- Piseta 500 mL
- Soporte para microscopio impreso en 3d
- 6 vasos de precipitado 100 mL
- 6 matraces aforados 100 mL
- Hoja de Papel milimétrico

Equipo

- Parrilla de calentamiento
- Microscopio con lámpara LED
- Minilap
- Bomba para vacío
- Desecador NALGENE™, (711 mm de vacío por 24 h).
- Estufa
- ICP, Espectrómetro de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente.
- Detector RAD 7
- Detector EDA 200
- Placas de CR39
- Potenciómetro
- Termómetro

Reactivos

- Grenetina marca KNOX®
- Agar
- Agua Tipo 1 MQ a 22° C
- Ampicilina de 200 mg

- Yodo (ISODYNE® polivinil pirrolidona, 11 g en 100 mL de excipiente)
- Disolución de Azul de metileno (0.1 g en 100 mL de Metanol)
- Ácido nítrico
- Sales de Uranio grado analítico
- Mineral de Uranio de Coahuila
- Silica Gel
- Biopolímero preparado (agar y grenetina (diferentes dosis))
- Jabón extrán
- Metanol
- Disolución de KOH (0.6M)
- Disolución de KOH (6M)
- Ácido nítrico concentrado
- Peróxido de hidrógeno
- Hidróxido de Potasio en Perlas bajo en cloruro Baker® (KOH)

PROCEDIMIENTO

Desarrollo del biopolímero

Se realizaron varias pruebas, primero para definir el material a utilizar, considerando las propiedades físicas y de respuesta a la deformación debida al impacto de las partículas alfa en la superficie del material. En la Figura 2.2 se puede observar el proceso llevado a cabo para seleccionar el biopolímero ideal.

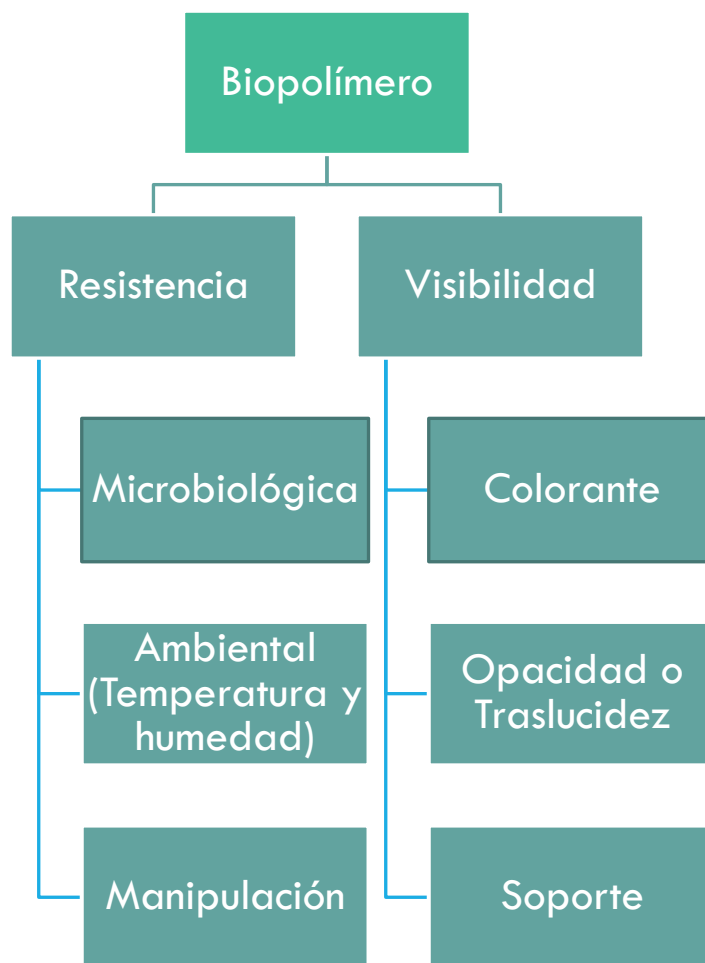


Figura 2. 2 Proceso y características del Biopolímero.

En la Tabla 2.1 se presenta el material y las condiciones de matriz de las pruebas realizadas para obtener el biopolímero ideal.

Tabla 2. 1 Material y Condiciones de Matriz.

Prueba	Grenetina (g)	Agar (g)	Agua MQ (mL)	Antibiótico	Antiséptico	Recipiente	Área	Grosor
1	15g	-	200 mL	-	-	Tupper	2 cm x 2 cm	1 cm
2	28g	-	200 mL	Ampicilina 200 mg	-	Tupper	2 cm x 2 cm	1 cm
3	28g	-	200mL	-	Yodo (3 mL)	Tupper	2 cm x 2 cm	1 cm
4	14 g	-	60mL	-	Yodo (5 mL)	Tupper	2 cm x 2 cm	0.5 cm
5	-	69 g	50 mL	-	Yodo (5 mL)	Tupper	2 cm x 2 cm	1 cm
6	14 g	-	60 mL	-	Yodo (5 mL)	8 Cajas Petri Chicas	6 cm x 1.5 cm	0.5 cm
7	28 g	-	120 mL	-	Yodo (10 mL)	16 Cajas Petri Chicas	6 cm x 1.5 cm	0.5 cm
8	14 g	-	40 mL	-	Yodo (5 mL)	5 Cajas Petri Chicas	6 cm x 1.5 cm	0.5 cm

Prueba 1:

- Se preparó una mezcla de 15 g de grenetina diluidos en 200 mL de agua.
- Se encendió la parrilla de calentamiento a la máxima potencia, colocando encima el Vaso de Precipitado de 500 mL con 200 mL de agua.
- Cuando el agua comenzó a hervir, se agregó el vaso con grenetina a baño maría y se agitó hasta que ya no quedaron grumos ni partículas suspendidas (20 minutos) Fig. 2.4.
- Se realizó una prueba de adherencia, para observar si la grenetina se pegaba y despegaba con facilidad.

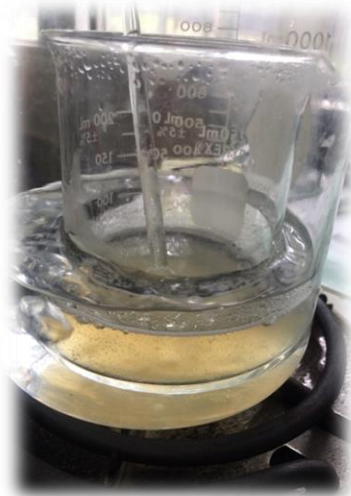


Figura 2. 3 Grenetina a baño María

- Se esperó hasta que desaparecieron las burbujas, se vertió la mezcla en el tupper (previamente marcado).
- Al momento de cuajar y enfriar los cuadros fueron cortados con el bisturí, Figura 2.5.
- También se realizó tinción con el colorante azul de metileno, para observar si funcionaba como método para tinción.



Figura 2. 4 Tupper molde

Prueba 2:

- Inició calentando el vaso de precipitado con 200 mL de agua.
- Comenzó a hervir y se añadieron los 28 g de grenetina poco a poco.

- Se agitó por 20 minutos hasta que desaparecieron los grumos. Una vez disuelta, fue triturada la pastilla de ampicilina de 200 mg y disuelta. Se vertió en el molde Figura 2.6.



Figura 2. 5 Superficie de biopolímero de la segunda prueba.

Prueba 3

- Se optó por un antiséptico fácil de adquirir y de bajo costo con la misma proporción de 28 g del biopolímero por 200 mL, calentando el agua hasta hervir en el vaso de precipitado, añadiendo poco a poco la grenetina y agitando a la vez por 20 minutos.
- Una vez disuelto, se dejó enfriar un poco para evitar la formación de burbujas y se añadió yodo (Figura 2.7). Se vertió en el recipiente “tupper”, cuando enfrió y cuajó por completo se cortó con el bisturí.

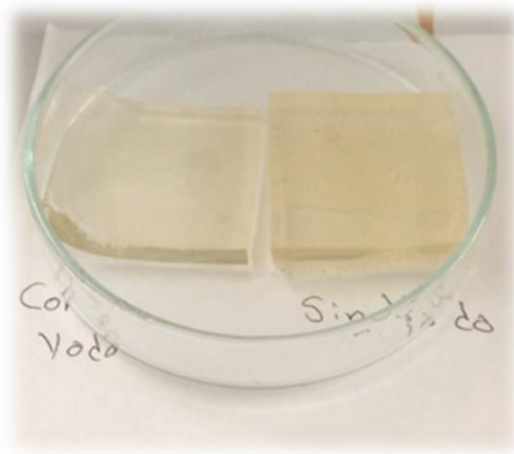


Figura 2. 6 Biopolímero con yodo y sin yodo.

Prueba 4

- Se preparó biopolímero con mayor concentración, 14 g de grenetina en 60 mL de agua MQ tipo 1, disolviendo en el vaso de precipitado mientras hervía, cuando ya no habían partículas suspendidas y la temperatura era menor (es decir que se podía tocar la parte inferior del vaso con la mano, sin ningún problema) se disolvió el yodo.
- Se dejó enfriar y se cortó con el bisturí, se hizo más delgada para que fuera más traslúcida y se observara mejor.

Prueba 5

- Se realizó una prueba con Agar, ya que es ampliamente utilizado en la experimentación y tiene la característica de evitar la infestación por microbios cuando es puro.
- Se preparó conforme el instructivo del envase, 69 g en 50 mL de agua hirviendo, al igual que en la grenetina, se añadió el Yodo cuando se podía tocar con la mano, la parte inferior del vaso, no se le realizó fundición ni esterilización. No presentó ninguna burbuja, y cuajó de manera casi inmediata, se preparó con 2 cm x 2 cm de área y 1 cm de grosor (Figura 2.8).



Figura 2. 7 Biopolímero de Agar.

Prueba 6

- Se utilizó un baño maría preparado con dos vasos de precipitado, uno para calentar el agua y otro para disolver Figura 2.9.
- Se encendió la parrilla de calentamiento a la máxima potencia, colocando una cantidad aproximada de 100 mL de agua en el vaso, cuando comenzó a hervir se midió la cantidad de 60 mL en la probeta y en el otro vaso ya se había colocado la grenetina en polvo.
- Bajando la potencia de la parrilla de calentamiento al mínimo, se colocó el vaso con 14 g de grenetina y se añadieron 60 mL de agua, tratando de agitar solo si era necesario para que no se formaran burbujas, durante máximo 5 minutos para no perder la propiedad gelatinizante.
- No se dejó enfriar, ya que comenzaba a cuajarse, se añadió el yodo; las cajas petri de 60 mm x 15 mm ya estaban preparadas, (porque son estériles) para recibir la grenetina en un volumen de 10 mL cada una aproximadamente (las cajas poseen una seña a los .4 cm de alto), Figura 2.10.

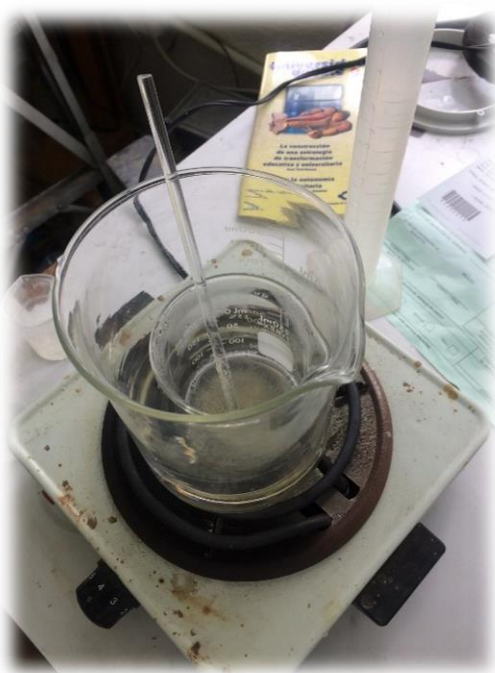


Figura 2. 8 Baño maría con dos vasos.



Figura 2. 9 Cajas Petri con Biopolímero.

Prueba 7

- Se repitió la prueba 6 en la experimentación final, solo se modificaron los valores dependiendo de la cantidad que se necesitaba, apegados a la proporción de la prueba 6.
- Para realizar el blanco se prepararon 28 g de grenetina en 120 mL de agua, con 10 mL de yodo, fue suficiente para 16 cajas Petri chicas, el manejo en las cajas petri era más sencillo porque la medida ya está estandarizada.
- También se realizó la mezcla para llevar a campo (5 cajas) y para dejar en el laboratorio en exposición (16 cajas), con un total de 180 mL de agua, 42 g de grenetina y 15 mL de yodo.

Prueba 8

- Se hizo un cambio en la forma de calentar y en la concentración ya que no iba a surgir pérdida de humedad durante el calentamiento.
- La grenetina en polvo, se colocó en un recipiente de boca ancha no metálico, se le añadió el agua con el yodo previamente disuelto, se dejó hidratar durante 1 minuto y se metió al microondas durante 40 segundos.

- Una vez líquida se pasó de inmediato a las cajas Petri para evitar que comenzara a cuajarse.

Desarrollo de la curva de exposición al ^{222}Rn

Se buscó un método idóneo para realizar una curva de calibración al exponer el biopolímero, el procedimiento experimental se resumen en la tabla 2.2.

Tabla 2. 2 Desarrollo de curva de calibración.

Prueba	Inducción al Vacío	Contenedor para exposición	Capacidad del contenedor	Contenedor de biopolímero	Tiempo	Material radiactivo	Cantidad de material radiactivo
1	Recubrimiento de hule cristal	Tupper	500 mL	Vidrio de reloj	24 h-48 h	Mineral de Uranio	No se midió
2	Bomba para vacío	2 embudos de separación	500 mL y 1 L	Abatelenguas	24 h- 48 h y 72 h-96 h	Sales de Uranio	1 g, 0.5 g para cada embudo
3	Bomba para vacío	2 embudos de separación	500 mL y 1 L	Abatelenguas	24 h- 48 h y 72 h-96 h	Sales de Uranio	1 g, 0.5 g para cada embudo
4	Bomba para vacío	Embudo de separación	1 L	Abatelenguas	24 h- 48 h y 72 h-96 h	Sales de Uranio	1 g, 0.5 g para cada embudo
5	Bomba para vacío	Embudo de separación	1 L	Abatelenguas	24 h- 48 h - 72 h-96 h	Mineral de uranio	1.69 g
6	Bomba para vacío	deseccador	71.12 cm ³ .7112 L ³	Cajas Petri Chicas	24 h- 48 h - 72 h-96 h	Ninguno	0 g
7	Bomba para vacío	deseccador	71.12 cm ³ .7112 L ³	Cajas Petri Chicas	24 h- 48 h - 72 h-96 h	Mineral de Uranio	16.7485 g
8	Bomba para vacío	deseccador	71.12 cm ³ .7112 L ³	Cajas Petri Chicas	24 h - 48 h - 72 h-96 h	Mineral de Uranio	16.7485 g

Prueba 1

- En un recipiente “tupper” con tapa, se colocó el mineral de uranio y un cuadro de biopolimero sobre vidrio de reloj, envuelto con hule cristal para evitar que el gas escape. Permaneciendo ahí durante 24 h, se revisó y se dejó otras 24 h más.

Prueba 2

- Los dos embudos de separación fueron lavados perfectamente con extran, y enjuagados con metanol y se les conectó una manguera para vacío.
- La boca de los embudos era pequeña, así que se cortó el biopolímero en tiras de 1cm x 2 cm, y se colocaron sobre un abatelenguas de madera Fig.2.11.
- A cada abatelenguas le cabían 4 de esas tiras, por lo tanto a cada uno se le asignó duración en horas y fueron 4 abatelenguas para los 4 días en total Fig. 2.12.
- Los abatelenguas para 24 h y 48 h se metieron en el embudo de separación con capacidad de 500 mL y los abatelenguas para 72 h y 96 h en el embudo de separación con capacidad de 1 L Fig. 2.13.
- Para cada embudo, se agregaron 0.5g de sales de uranio puras en un tubo de ensayo, para meterlo al embudo con cuidado y sellar al vacío.

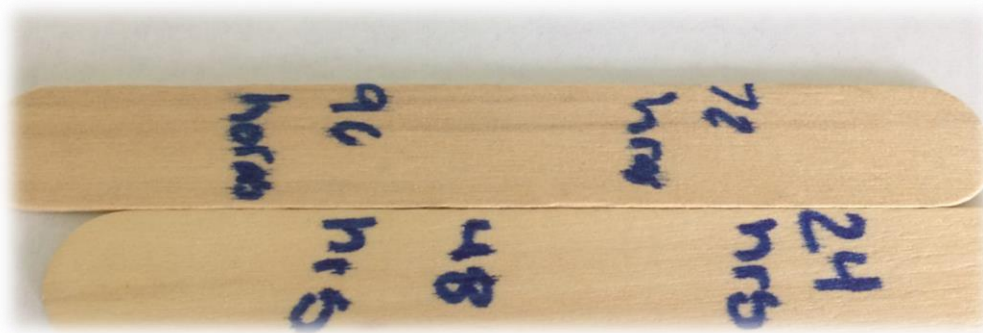


Figura 2. 10 Abatelenguas

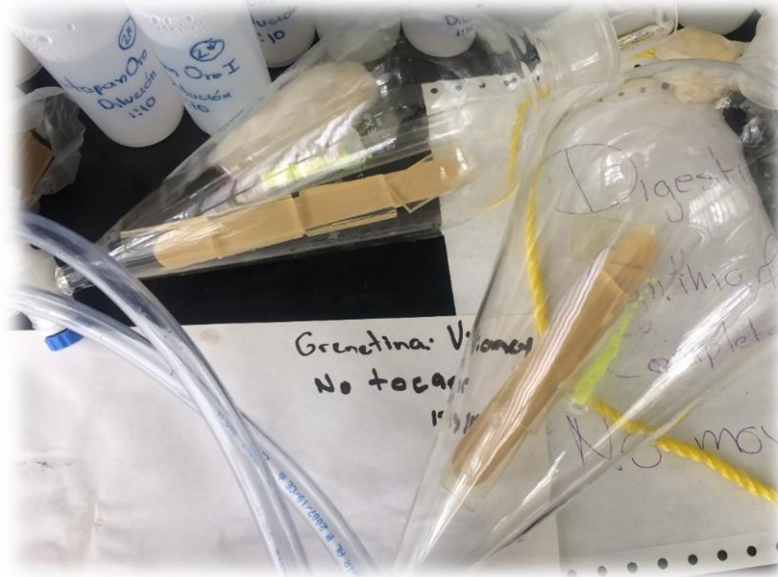


Figura 2. 11 Embudos con abatelenguas.

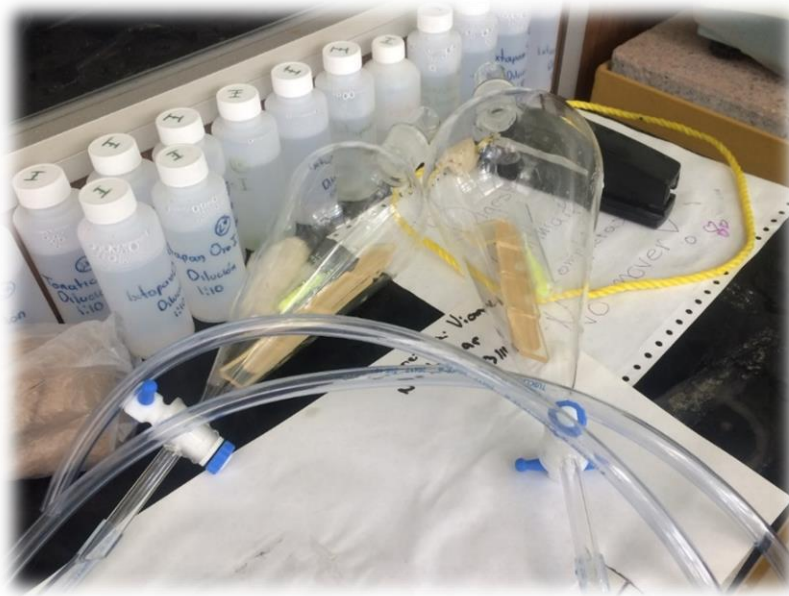


Figura 2. 12 Embudos con sales de uranio y abatelenguas.

Prueba 3

- Se realizó el mismo procedimiento anterior, pero con un biopolímero diferente Fig. 2.14.

- Se lavaron los dos embudos de separación perfectamente con extran, se enjuagaron con metanol y se conectó una manguera para vacío.
- Como la boca de los embudos era pequeña, se cortó el biopolímero en tiras de 1cm x 2 cm, y se colocó sobre abatelenguas de madera Figura 2.15.
- A cada abatelenguas le cabían 4 tiras de biopolímero, por lo tanto a cada uno se le asignó duración en horas, 4 abatelenguas para los 4 días en total.
- Los abatelenguas se metieron durante 24 h y 48 h en el embudo de separación con capacidad de 500 mL y 72 h y 96 h en el embudo de separación con capacidad de 1 L.
- Para cada embudo, se pesaron 0.5 g de sales de uranio puras y se colocaron en un tubo de ensayo, se selló al vacío.



Figura 2. 13 Embudo de 1 L con biopolímero de agar.



Figura 2. 14 Embudo de 1 L con biopolímero de agar y tubo de ensayo con sales de Uranio

Prueba 4

- El embudo de separación de 1 L se lavó con extrán, se enjuagó con agua, luego con metanol y posteriormente se metió a la estufa (40° C) durante 1 hora para que se secase por completo y no quedaran residuos de humedad, se dejó enfriar a temperatura ambiente. Como la boca del embudo era estrecha, se realizaron cortes del biopolímero con ayuda del bisturí en tiras de 1cm x 2 cm, y se colocó sobre el abatelenguas de madera.
- En cada abatelenguas hay capacidad para 4 tiras de biopolímero, por lo tanto a cada uno se le asignó duración en horas y fueron 4 abatelenguas para los 4 días en total.
- Se introdujeron los 4 abatelenguas al embudo Fig. 2.16 y 2.17.
- Se pesaron 0.5g de sales de uranio puras y se colocaron en un tubo de ensayo, para después meterlo al embudo de separación y sellar al vacío.

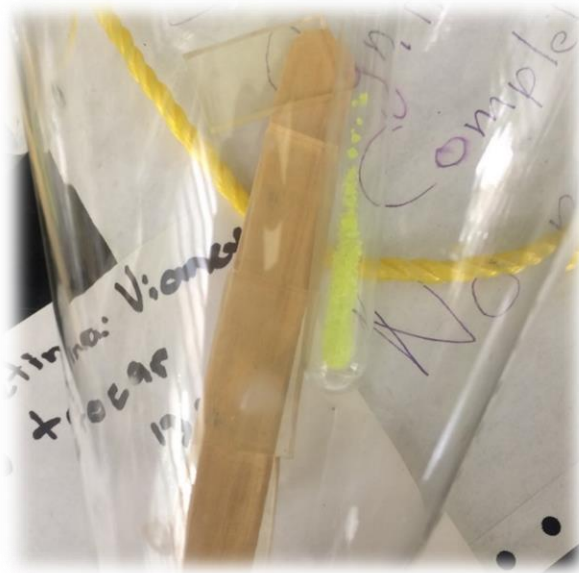


Figura 2. 15 Embudo de 1 L con mineral de Uranio y biopolímero.



Figura 2. 16 Embudo de 1 L con biopolímero y mineral de Uranio.

Prueba 5

- Se lavó el embudo de separación de 1 L, con extrán y metanol, posteriormente se introdujo a la estufa (40° C) durante 1 hora para que no

quedaran residuos de humedad, cuando se enfrió se continuó con el procedimiento.

- Como la boca de los embudos era estrecha, se realizaron cortes del biopolímero en tiras de 1cm x 2 cm, y se colocó sobre el abatelenguas de madera.
- A cada abatelenguas le cabían 4 de esas tiras, por lo tanto a cada uno se le asignó duración en horas y fueron 4 tiras por abatelenguas para los 4 días en total Figura 2.18.
- Se metieron las 4 tiras en el abatelenguas dentro del embudo.
- En el otro embudo se hizo por duplicado Figura 2.19.
- Se pesó un trozo pequeño de mineral de uranio (1.69 g) y también se introdujo al embudo de separación, sellé al vacío.

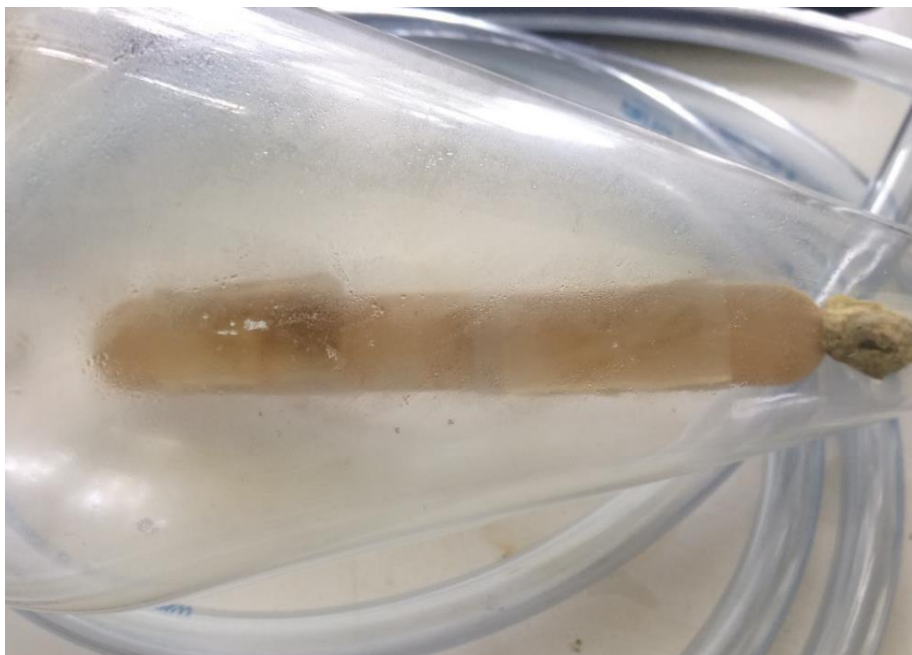


Figura 2. 17 Embudo con biopolímeros en abatelenguas y mineral de uranio.



Figura 2. 18 Embudo con abatelenguas por duplicado.

Prueba 6

- Se vertió la mezcla del polímero en cajas Petri.
- Las cajas Petri estaban esterilizadas Figura 2.20.
- Se utilizó un desecador de 23 mm de diámetro, con placa y sílica gel en la base.
- En esta prueba se introdujo el blanco. Colocando 18 cajas Petri en el desecador sellado al vacío Figura 2.21.
- Realizando revisiones en intervalos de 1 día de duración, 24 h, 48 h, 72 h y 96 h.



Figura 2. 19 Cajas Petri estériles.



Figura 2. 20 Desecador con cajas petri (Blanco).

Prueba 7

- Esta prueba consiste en 16 cajas Petri chicas con un trozo de mineral de uranio que pesó 16.7485 g dentro del desecador Figura 2.22.



Figura 2. 21 Desecador con cajas Petri

Prueba 8

Esta prueba es una repetición de la prueba anterior, se expusieron 16 cajas Petri chicas, a intervalos de 24 h, 48 h, 72 h y 96 h. En el desecador NALGENE™, completamente al vacío (711 mm de vacío por 24 h) . Con 16.7485 gramos de Mineral de U Figura 2.23 y Figura 2.24.

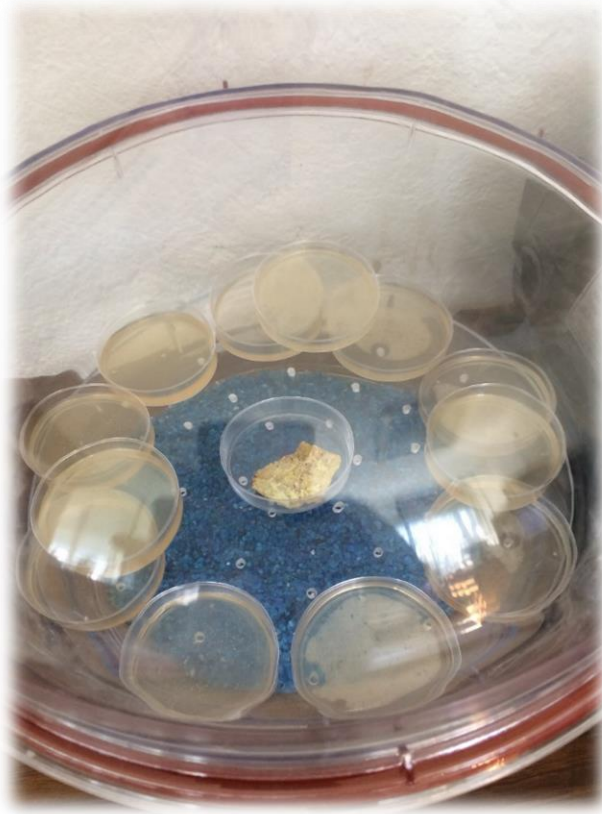


Figura 2. 22 Biopolímero con mineral de Uranio en desecador.



Figura 2. 23 Desecador conectado a bomba de vacío, con biopolímeros revelados (azules) y biopolímeros en exposición

Demostración de emulación

Para demostrar que el efecto que puede tener el mineral de Uranio en el tejido de un ser vivo es similar al del biopolímero, se realizó una prueba con el pulmón de cerdo, se le aplicaron las mismas condiciones que al biopolímero Figura 2.25.

Se dividió en 4 diferentes tipos de tejido (Tráquea, Pulmón centro, Pulmón superficie y Alveolo) Figura 2.26. Se realizaron cortes con ayuda de un equipo de disección de acero inoxidable, se colocaron sobre porta objetos y se expusieron en el desecador durante 24 horas Figura 2.27 y 2.28 con uranio.



Figura 2. 24 Pulmón de cerdo fresco

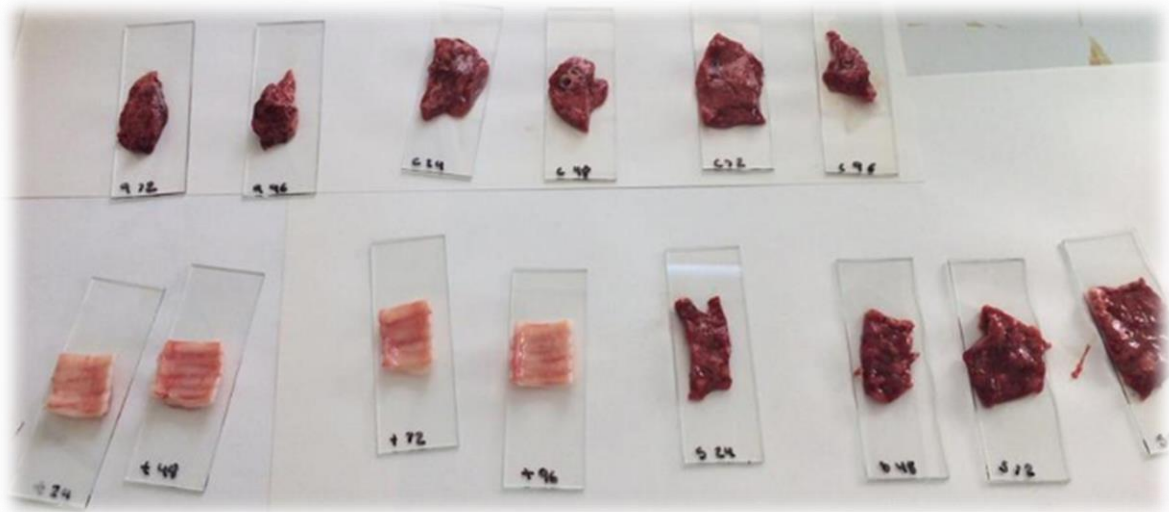


Figura 2. 25 Tejidos (T-Tráquea, C- Pulmón centro, S- Pulmón superficie, A- alveolo).

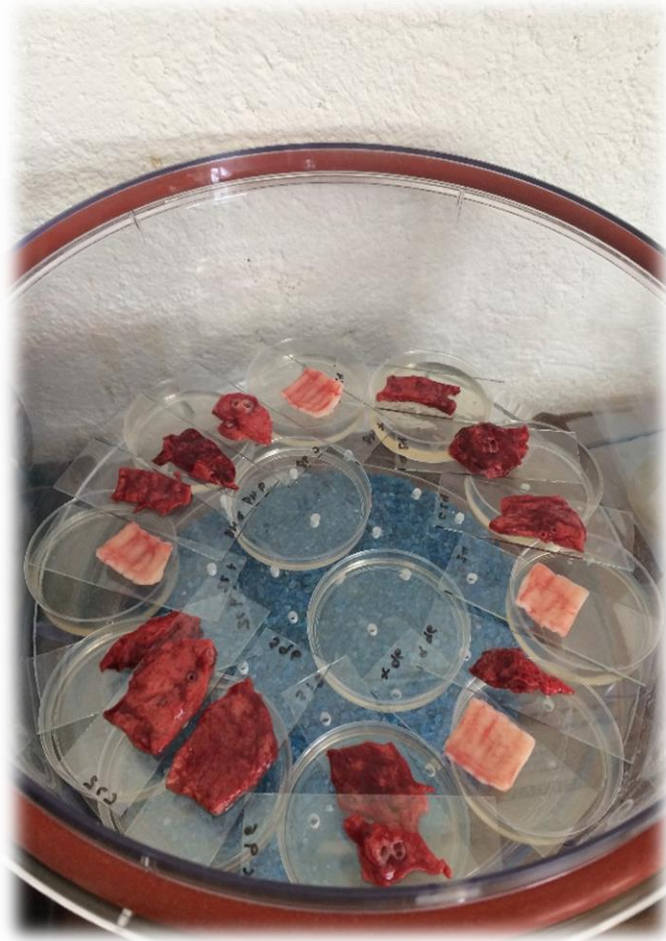


Figura 2. 26 Orden de exposición.



Figura 2. 27 Biopolímero y tejido en desecador con mineral de Uranio.

Exposición del detector de biopolímero en campo.

Se realizaron exposiciones en campo, con el biopolímero óptimo Tabla 2.3.

Tabla 2. 3 Exposiciones en campo.

	Localidad	Coordenadas	Temperatura	pH	Sólidos disueltos	Otros detectores	Tiempo de exposición	Hora del día
Mina	Mineral del Chico	20° 13' 14" N 98° 44' 10" O	NA	NA	NA	RAD 7 EDA 200 CR39	1 hora	14:15 pm
Unidad Habitacional	Pantitlán	19° 42' 90"N 99° 06' 74"O	NA	NA	NA	RAD 7 EDA 200 CR39	1 hora	12:05 pm
Agua	Las Cascadas	19° 45' 41"N 99° 29' 21" O	Termómetro	Potenciómetro	Potenciómetro	-	1 hora	11:59 am
Aguas termales	Tonatico	18° 48' 55"N 99° 40' 5" O	Termómetro	Potenciómetro	Potenciómetro	-	1 hora	4:00 pm

Prueba 1

- Agujerar los vasos con ayuda del clip y el encendedor en la parte inferior del vaso y, cortar las bolsas de plástico a manera que puedan cubrir la boca del vaso.
- Quitar los plásticos de la placa de CR39, colocar la placa de CR39 en el clip en la parte inferior del vaso, quedando la placa dentro del vaso y asegurar el clip con el silicón.
- Tapar la boca del vaso con un trozo membrana de plástico permeable al Rn e impermeable al agua y asegurar con una liga (Figuras 2.29 y 2.30).



Figura 2. 28 Placas de CR39.



Figura 2. 29 Placas de CR39.

- Se colocó el detector CR39 dentro de la mina.
Mineral del Chico, $20^{\circ} 13' 14''$ N $98^{\circ} 44' 10''$ O:
“Socavón del Minero”, Mina de San Antonio, 500 m de profundidad.
Se colocó el detector dentro de la mina Figuras 2.31 y 2.32.
- En la Unidad Habitacional, Pantitlán, Ciudad de México, $19^{\circ} 42' 90''$ N $99^{\circ} 06' 74''$ O. Se colocó un detector CR39 y un biopolímero.



Figura 2. 30 Detector biopolímero.



Figura 2. 31 Detector EDA 200.

Prueba 2

- En campo se realizó una exposición, con cinco cajas Petri con biopolímero detector. De las cuales 2 fueron tomadas en las cascadas a las 11:59 am, coordenadas: 19° 45' 41''N 99° 29 ' 21'' O.
- Los biopolímeros detectores fueron colocados boca abajo, de tal manera que pudieran tomar los vapores presentes en el agua de la alberca, durante 1 hora Figura 2.33.
- En Tonicato coordenadas 18° 48 ' 55''N y 99° 40 ' 5'' O , dos biopolímeros detectores durante 1 hora a las 4: pm.



Figura 2. 32 Detector en las cascadas.

Revelado de Biopolimero:

El revelado se utiliza para poder observar mejor las trazas nucleares, por lo tanto es recomendable tener un buen desarrollo Tabla 2.4.

Tabla 2. 4 Revelado de trazas nucleares.

Prueba	Concentración Azul de Metileno	Concentración KOH	Tiempo de KOH	Tiempo de Azul de metileno	Exposición al aire de la bomba al vacío
1	0.1 g en 100 mL	6 M	30 s	60 s	-
2	0.01 g en 100 mL	0.6 M	30 s	60 s	-
3	0.1 g en 100 mL	0.6 M	60 s	60 s	60 s

Prueba 1.

- Se preparó una disolución de KOH 6 M, con 33.663414 gr de KOH en hojuelas en 100 mL de agua MQ Figura 2.34.
- Después se preparó la disolución de azul de metileno con 0.1 g de azul de metileno en 100 mL de metanol.
- Con ayuda de una pipeta Pasteur fueron vertidos 2 mL de la disolución de KOH en la superficie del biopolímero preparado, para revelar la capa superficial, durante 30 segundos, se enjuagó con agua MQ tipo 1 y se dejó secar 1 minuto, después se le añadió el azul de metileno 60 segundos.

- Se observó con el microscopio.

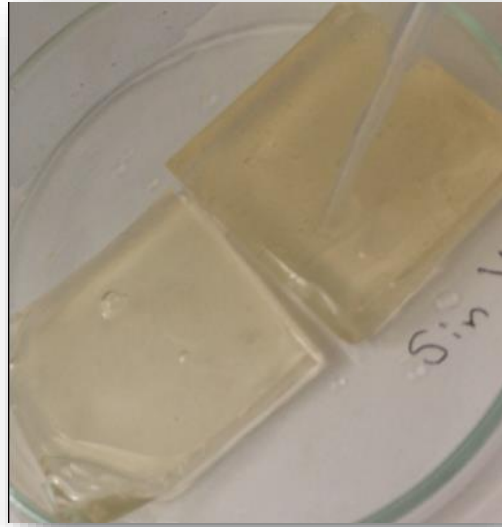


Figura 2. 33 Revelado con KOH 6M.

Prueba 2.

- Se preparó una disolución de KOH .6 M, con 3.3663 gr de KOH en hojuelas en 100 mL de agua MQ tipo 1.
- Después se preparó una disolución de .01g de azul de metileno en 100 mL de metanol MQ, pero es una solución muy diluida.
- Con ayuda de una pipeta Pasteur fueron vertidos 2 mL de la disolución de KOH en la superficie de la grenetina o agar preparado, para revelar la capa superficial de la grenetina, durante 60 segundos, se enjuagó con agua MQ y se dejó secar 1 minuto, después se le añadió el azul de metileno 60 segundos para volver a secar durante 1 minuto Figura 2.35.
- Se observó al microscopio.

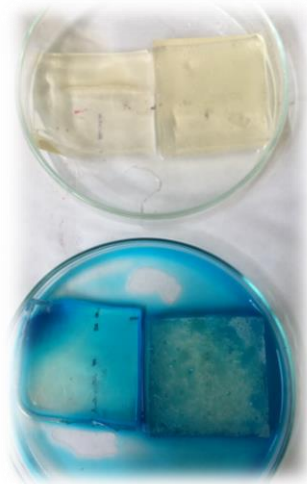


Figura 2. 34 Biopolímero revelado con KOH arriba, biopolímero con azul de metileno abajo.

Prueba 3

- Se utilizó la disolución de KOH .6 M, con 3.3663414 gr de KOH en hojuelas en 100 mL de agua MQ (Figura 2.36).
- Se preparó la disolución de 0.1g de azul de metileno en 100 mL de metanol.
- Primero con la pipeta Pasteur se vertió 2 mL de azul de metileno en la superficie del biopolímero.
- Se observó.
- Después fueron vertidos 2 mL de la disolución de KOH en la superficie del biopolímero preparado, para revelar la capa superficial durante 60 segundos, se enjuagó con agua MQ y se dejó secar durante 1 minuto, después nuevamente se añadió el azul de metileno 60 segundos para volver a secar durante 1 minuto (Figura 2.37).
- Se observó al microscopio.

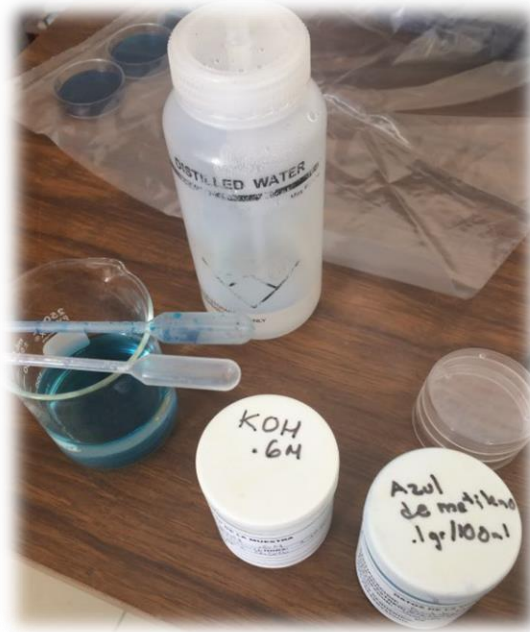


Figura 2. 35 Disoluciones listas para revelar y vaso de residuos

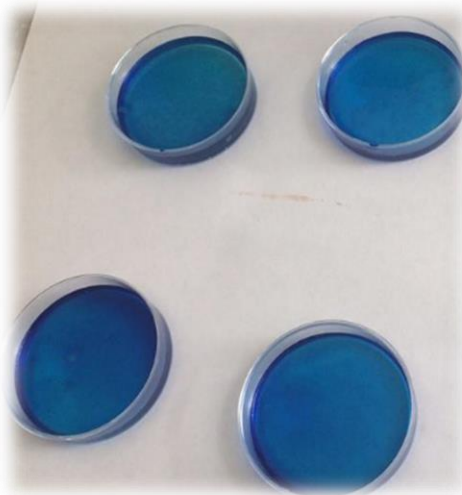


Figura 2. 36 Cajas Petri teñidas y reveladas, listas para observar.

Observación del biopolímero:

Para obtener una forma de visualización ideal y poder realizar el conteo se realizó la comparación con cuatro pruebas Tabla 2.5.

Tabla 2. 5 Observaciones en el biopolímero.

Prueba		Escala	Área definida	Soporte
1	Biopolímero	Ninguna	2 cm ²	Ninguno
2	Biopolímero	Papel Milimétrico	6 x 1.5 cm	Ninguno
3	Agar	Papel Milimétrico	2 cm ²	Ninguno
4	Biopolímero	Papel Milimétrico	4 cm ²	Impreso en 3d

Prueba 1

- El Biopolímero a se observó con ayuda de un microscopio de campo marca STEREN® (40 X) y se realizó el conteo en el cuadro de 2cm x 1 cm del biopolímero.

Prueba 2

- El biopolímero se observó con ayuda de un microscopio de campo marca STEREN (40 X) y una hoja de papel milimétrico debajo, para poder obtener una escala apropiada Figuras 2.38 y 2.39.



Figura 2. 37 Microscopio y biopolímero teñido.



Figura 2. 38 Observación de trazas en biopolimero

Prueba 3

Se observó el agar con un microscopio de campo marca STEREN (40 X).

Prueba 4

Se mandó a maquilar un soporte para microscopio en una impresora 3d y se observó con la hoja de papel milimétrico debajo. Se realizó un conteo en un área de 4 cm^2 , para dividirse entre 4 y tomar solo el valor de 1 cm^2 , Figuras 2.40 y 2.41.



Figura 2. 39 Microscopio de campo con soporte, para observar biopolímero



Figura 2. 40 Equipo preparado para observar

Exposición de tejido de pulmón de cerdo

Se decidió comparar el efecto en un pulmón de cerdo fresco. Se realizó la misma exposición para el biopolímero, en el desecador NALGENE™, completamente al vacío (711 mm de vacío por 24 h). Con 16.7485 gramos de mineral de uranio.

Las muestras de tejido se dividieron en tráquea, pulmón centro, pulmón superficie, alveolos Figura 2.42.

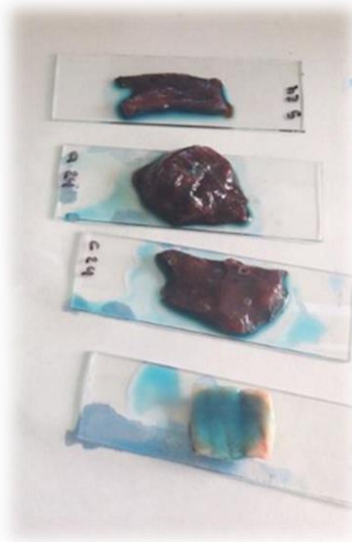


Figura 2. 41 Teñido de tejido revelado y listo para observarse.

Digestiones de Grenetina para análisis de Uranio

- Los biopolímeros control se colocaron uno por uno en vasos de precipitado.
- A cada vaso se le agregó 5 mL de agua ultra pura.
- Posteriormente se le añadió 10 mL de ácido nítrico
- Se metieron en la campana durante 40 minutos hasta que los grumos desaparecieron
- Se añadió 2 mL de peróxido de hidrógeno y se dejó otros 10 minutos
- Se apagó la parrilla
- Se dejó enfriar y se metió en los matraces aforados, se dejó esperar 12 h, se aforó a 100 mL.

Digestiones de Mineral de Uranio para análisis de Uranio

- Se tomó un trozo pequeño de mineral de uranio, que se aproximara a la cantidad de 0.1 g.
- Se trituró con ayuda de un mortero de ágata.
- El polvo se pesó en una balanza analítica, la cantidad era 0.18 g.
- Se colocó en el vaso de precipitado y se le agregó 5 mL de ácido fluorhídrico y 1 mL de agua MQ tipo 1.
- Se metió en la campana y parrilla de calentamiento durante 3 horas.
- Se le añadió 5 mL de ácido nítrico y 1 mL de ácido clorhídrico.
- Una vez enfriado, se aforó en 100 mL de agua MQ tipo 1.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

Desarrollo del biopolímero

Prueba 1

- Adherencia adecuada, se pegaba y despegaba con facilidad.
- Contaminación con hongos y bacterias
- La tinción con azul de metileno fue adecuada.

Prueba 2

- No se distingue entre el daño por las partículas alfa y la presencia del antibiótico Figura 3.1.
- Mala respuesta a la tinción con azul de metileno.
- No hubo contaminación por microbios.



Figura 3. 1 Biopolímero con antibiótico.

Prueba 3

- La grenetina es traslúcida
- No se contaminó con hongos
- El grosor y el teñido con yodo no produce una vista óptima Figura 3.2
- Es inestable a la manipulación pues presenta alta fragilidad

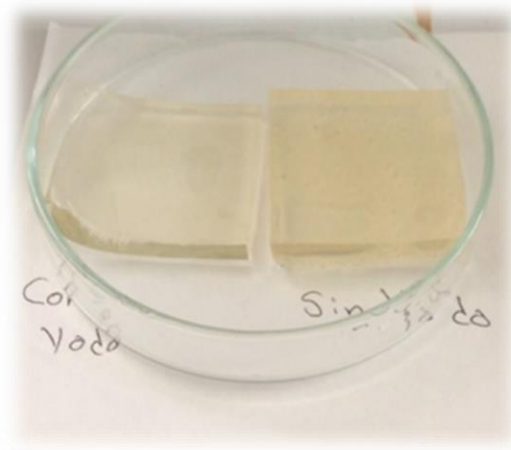


Figura 3. 2 Grenetina con yodo y sin yodo

Prueba 4

- Resultó ser poco resistente y se dejó a la intemperie para observar si se contaminaba o le ocurría algo.
- Tuvo muchas burbujas y la capacidad de solidificar no era buena.

Prueba 5

- Se observó opacidad, se puede observar los daños por radiación pero un conteo era difícil Figura 3.3.
- No se contaminó
- Su resistencia resultó nula, ya que no es elástico y se fracturaba con facilidad.



Figura 3. 3 Biopolímero base Agar

Prueba 6

- La preparación en baño María no presenta la formación de burbujas.

Prueba 7

- Se repitió la prueba 6 en la experimentación final obteniendo buena resistencia.

Prueba 8

- Calentamiento con microondas. Buenas propiedades porque el calentamiento resultó homogéneo y se disolvió a partes iguales.

Pruebas de exposición del material al radón

Prueba 1

- Se formaron hongos a los 2 días de exposición.

Prueba 2

- En la manipulación se cometían muchos errores, al intentar sacar los abatelenguas con el biopolímero se rayaban o se quebraban, con la humedad, el mineral de U se hidrató y ya no sirvió Figura 3.4.



Figura 3. 4 Abatelenguas en embudo de separación con sales de Uranio ligeramente hidratadas

Prueba 3

- La hidratación continúa siendo un problema.

Prueba 4

- Continuaron los problemas de la hidratación. Por lo que se optó por utilizar mineral de Uranio.

Prueba 5

- No presentó problemas de hidratación, se realizó el conteo, sin embargo, la manipulación del biopolímero seguía siendo un problema, se decidió emplear un desecador Figura 3.5.



Figura 3. 5 Embudo con biopolímeros en abatelenguas y mineral de uranio

Prueba 6

- Para evitar la manipulación del biopolímero, se vertió la mezcla de este en cajas Petri.



Figura 3. 6 Desecador conectado a bomba de vacío, con biopolímeros revelados (azules) y biopolímeros en exposición

Prueba 7

- Se realizó esta prueba usando 16 cajas Petri chicas, con un trozo de mineral de uranio que pesó 16.7485 grs
- No hubo problemas.



Figura 3. 7 Biopolímero en cajas Petri, dentro del desecador.

Prueba 8

- Se repitió la prueba 7 dejando a intervalos de 24 h, 48 h, 72 h y 96 h. En el desecador NALGENE™, completamente al vacío (711 mm de vacío por 24 h). Con 16.7485 gramos de Mineral de U.

Exposición del detector de biopolímero en campo

Prueba 1

- El biopolímero no resistió adecuadamente las altas temperaturas de los traslados

Prueba 2

- El detector fue más resistente en las localidades y en los traslados.

Pruebas en tejido expuesto al radón.

En la Fig. 3.8 se puede observar el daño por radiación en el alveolo. Todas las manchas blancas de formas ligeramente ovales representan el daño por las trazas nucleares.

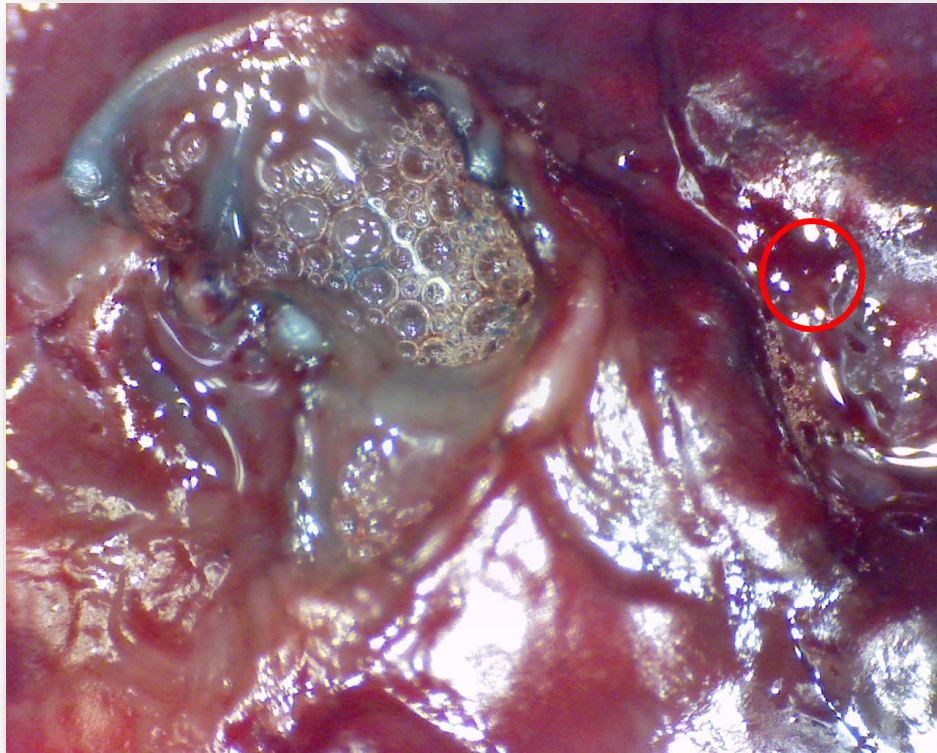


Figura 3. 8 Tejido de alveolo expuesto.

La siguiente imagen pertenece al centro y los daños por traza son más difusos, se confunden con la orografía del tejido. Figura 3.9.

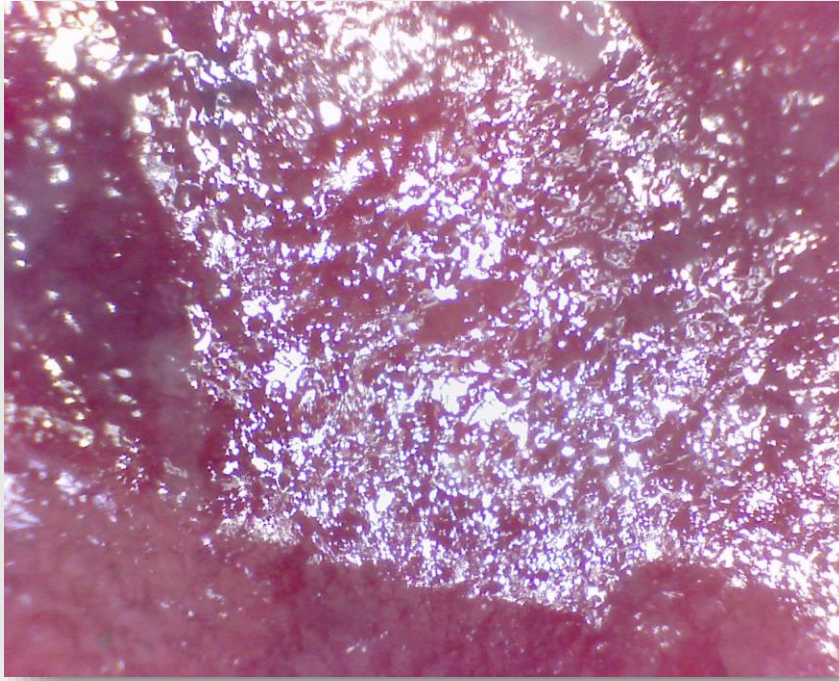


Figura 3. 9 Centro del tejido pulmonar.

En la siguiente imagen también se puede percibir el daño, aunque se confunde con las cavidades propias del tejido Figura 3.10.



Figura 3. 10 Tejido de superficie pulmonar.

El tejido de la tráquea se tiñó fácilmente y también se pueden observar los daños, Figura 3.11.



Figura 3. 11 Tráquea expuesta a radón.

Con estas fotografías se demuestra que existe un daño por radiación, pero no se puede cuantificar, porque es difícil observar y los tejidos no son resistentes ya que favorecen el crecimiento de bacterias, lo que ocasiona su descomposición. Por lo tanto el biopolímero está diseñado para detectar y cuantificar la radiación ionizante sin ningún problema.

Respuesta del biopolímero a las partículas alfa del ^{222}Rn

Se realizó una curva de calibración para definir la eficiencia interacción entre el mineral de Uranio (10.17% de U) y del Biopolímero.

Se tomaron las siguientes fotografías del control (Figuras 3.12, 3.13, 3.14, 3.15) de cada tiempo de exposición, 24 h, 48 h, 72 h y 96 h.

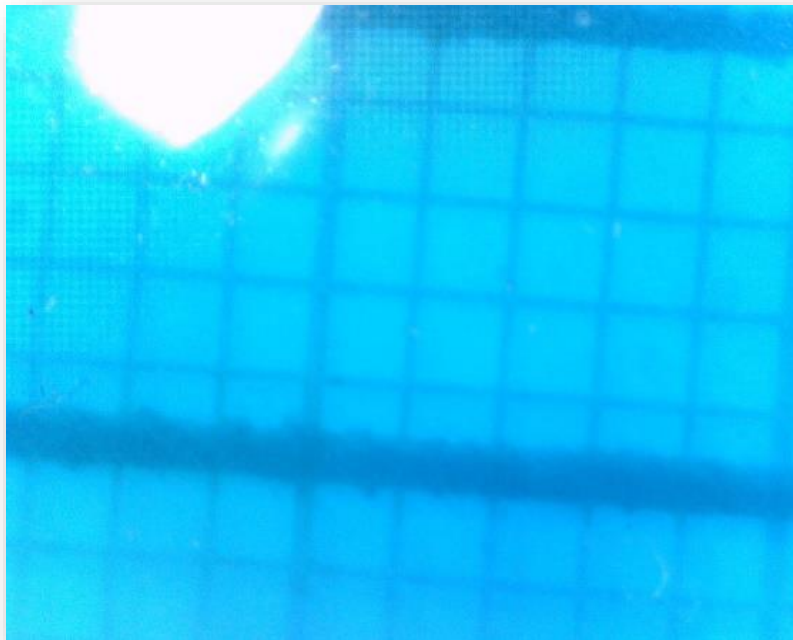


Figura 3. 12 Control 24 horas, revelado

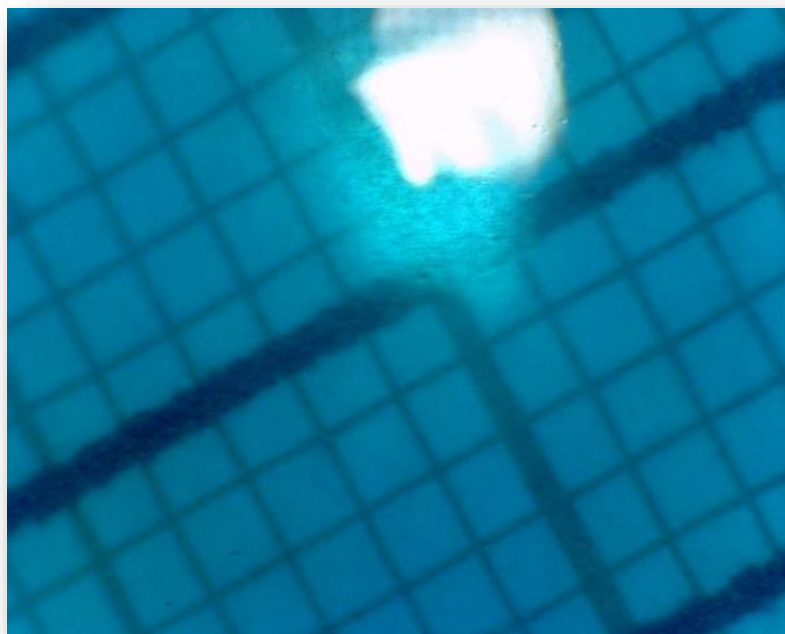


Figura 3. 13 Control 48 horas, revelado

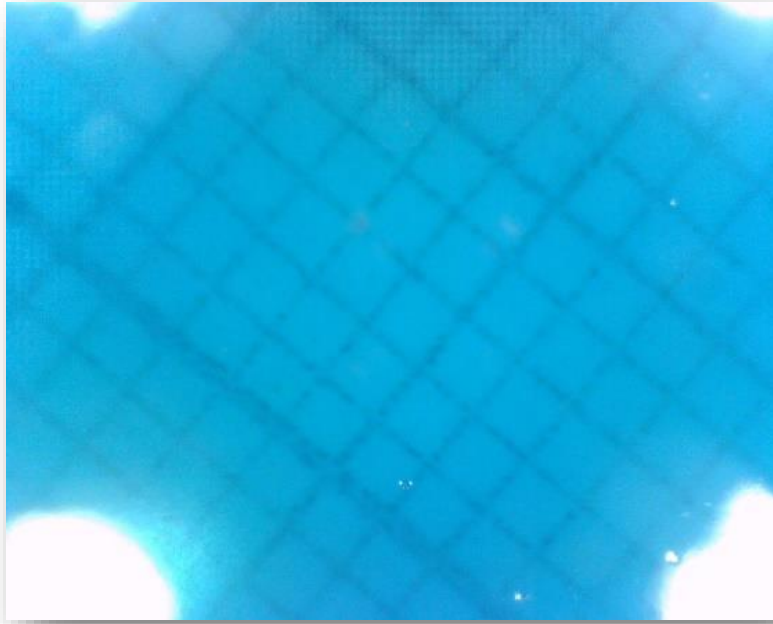


Figura 3. 14 Control 72 horas, revelado



Figura 3. 15 Control 96 horas, revelado

Se realizó el conteo de las trazas nucleares en el grupo control, utilizando Desecador al vacío de NALGENE™, (711 mm de vacío por 24 h) y sin mineral de uranio. Se muestra el promedio de trazas en el biopolímero revelado

Tabla 3. 1 Promedio de trazas nucleares por repetición

Control	
24 h	Revelado
1	0.75
2	0
3	0
4	0
	0.1875
48 h	
1	0
2	0
3	0
4	0
	0
72 h	
1	0
2	1
3	0
4	0.5
	0.375
96 h	
1	0
2	0.25
3	0
4	0
	0.625

Las siguientes fotografías pertenecen al biopolímero expuesto al mineral de U.

En la figura 3.16 se observa en el círculo amarillo, la presencia de una mancha, las manchas también fueron contadas y se presentan en las tablas.

En el círculo rojo se presentan trazas nucleares, en este caso hay cinco dentro del círculo, su rastro es más pequeño.

La fotografía 3.16 pertenece al lote de 24 h de exposición, la figura 3.17 al lote de 48 h, 3.18 al de 72 h, 3.19 al de 96 h. Todas las fotografías fueron tomadas con un soporte, para que fueran más nítidas. Ninguna está editada, solamente los círculos de colores que funcionan para identificar las trazas y las manchas.

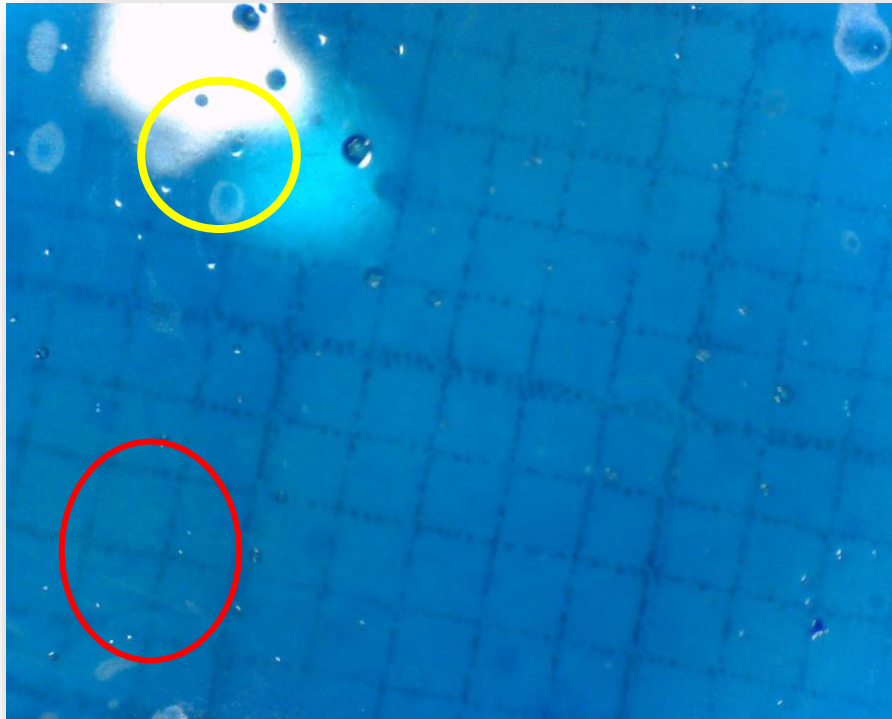


Figura 3. 16 Expuesto, 24 h.

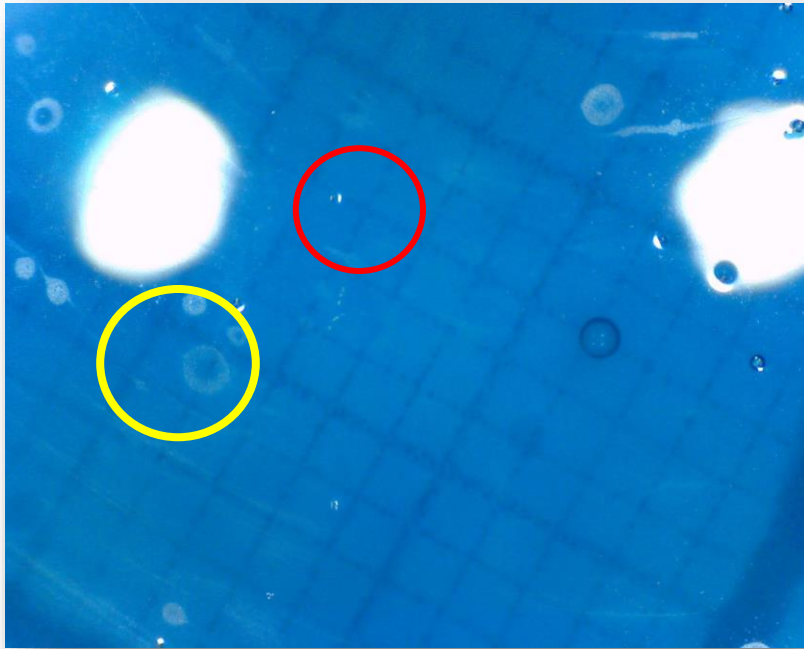


Figura 3. 17 Expuesto, 48 h

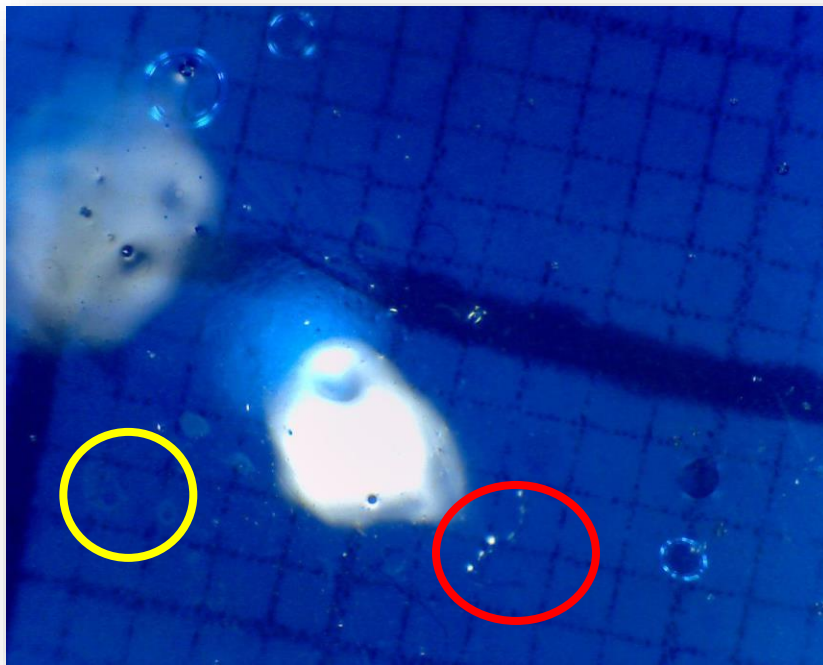


Figura 3. 18 Expuesto, 72 h

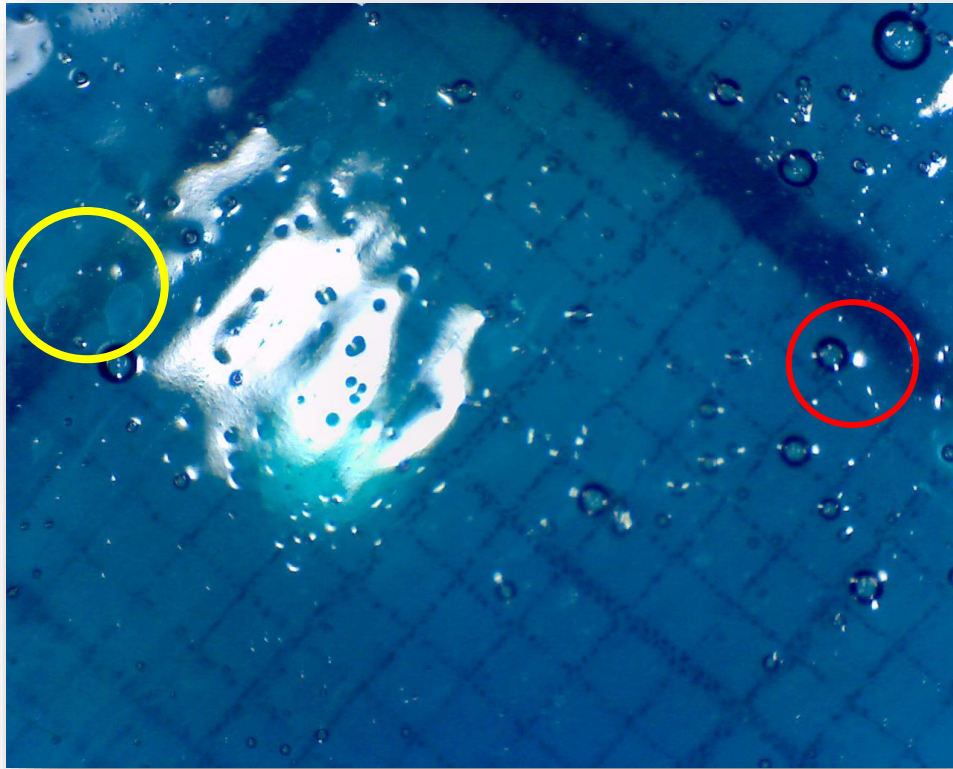


Figura 3. 19 Expuesto 96 h

El biopolímero se expuso a una cámara de radón, de 5000 bq, se muestra en la Figura 3.20.

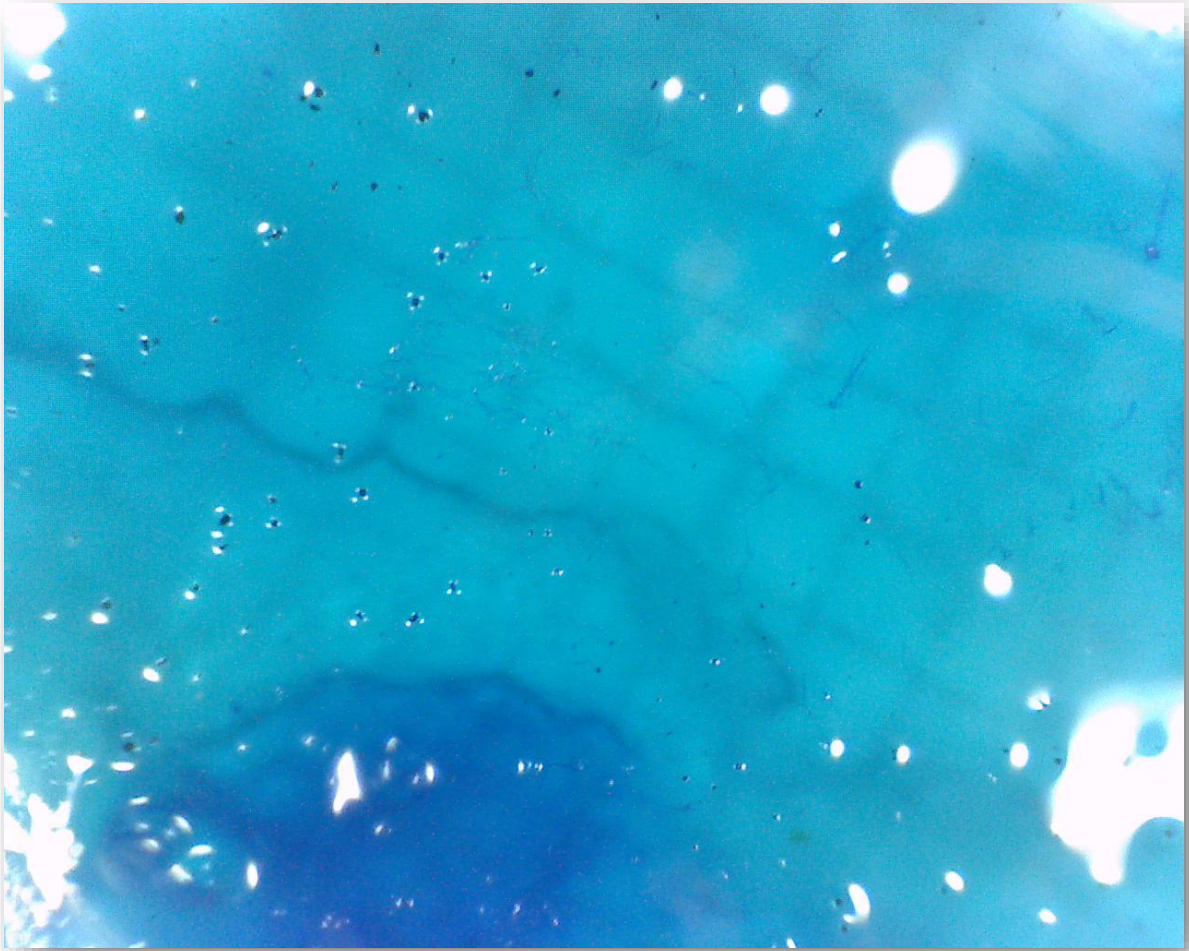


Figura 3. 20 Expuesto a cámara de Ionización Marca Eberline Modelo R0-5D, 5000 bq

El conteo se realizó tomando 4 cm² centrales de cada caja Petri expuesta al vacío, dividiendo el valor obtenido entre 4 para tomar solo la unidad de área (1 cm²).

En la Tabla 3.2 se muestran los resultados realizados en la exposición de 16.7485 g de Mineral de Uranio, en un Desecador al vacío de NALGENE™, (711 mm de vacío por 24 h). Con el promedio de las repeticiones de los diferentes intervalos de tiempo, 24 h, 48 h, 72 h, 96 h.

Tabla 3. 2 Promedio del conteo de trazas reveladas en biopolímero expuesto a mineral de uranio.

Con mineral		
24h		
Repetición	Revelado	
	trazas	manchas
1	208	8.25
2	36	9
3	87	8.75
4	32	8.5
5	46	17
6	44	10
7	41	12
8	68	12.5
48 h		
1	16	13.25
2	30	10.75
3	22.5	16.25
4	12.5	11.25
5	136	11
6	200	5
7	68	13
8	49	3
72 h		
1	72	16.25
2	40	16
3	108	28
4	44	26
5	48	30
6	88	28
7	72	15
8	76	11
96 h		
1	102	27
2	78	34
3	70	35
4	56	12
5	92	11
6	30	14
7	84	20
8	72	12

Se realizó el análisis estadístico con el programa InfoStat® y se obtuvieron los siguientes valores de la Tabla 3.3.

Tabla 3. 3 Promedios, D.E., Valor mínimo y Valor máximo de biopolímero expuesto a mineral

24 h					
		Promedio	D.E.	Minimo	Máximo
Trazas Revelado		70.25	58.59	32	208
Manchas Revelado		10.75	2.99	8.25	17
48 h					
		Promedio	D.E.	Minimo	Máximo
Trazas Revelado		66.75	67.29	12	200
Manchas Revelado		10.438	4.38	3	16.25
72 h					
		Promedio	D.E.	Minimo	Máximo
Trazas Revelado		68.5	23.46	40	108
Manchas Revelado		21.281	7.24	11	30
96 h					
		Promedio	D.E.	Minimo	Máximo
Trazas Revelado		73	22.35	56	102
Manchas Revelado		20.625	10.08	11	35

En la Tabla 3.4 se presenta el coeficiente de correlación entre el control y el expuesto.

Tabla 3. 4 Coeficiente de correlación de Pearson entre el control y el expuesto, coeficiente de correlación entre trazas y manchas.

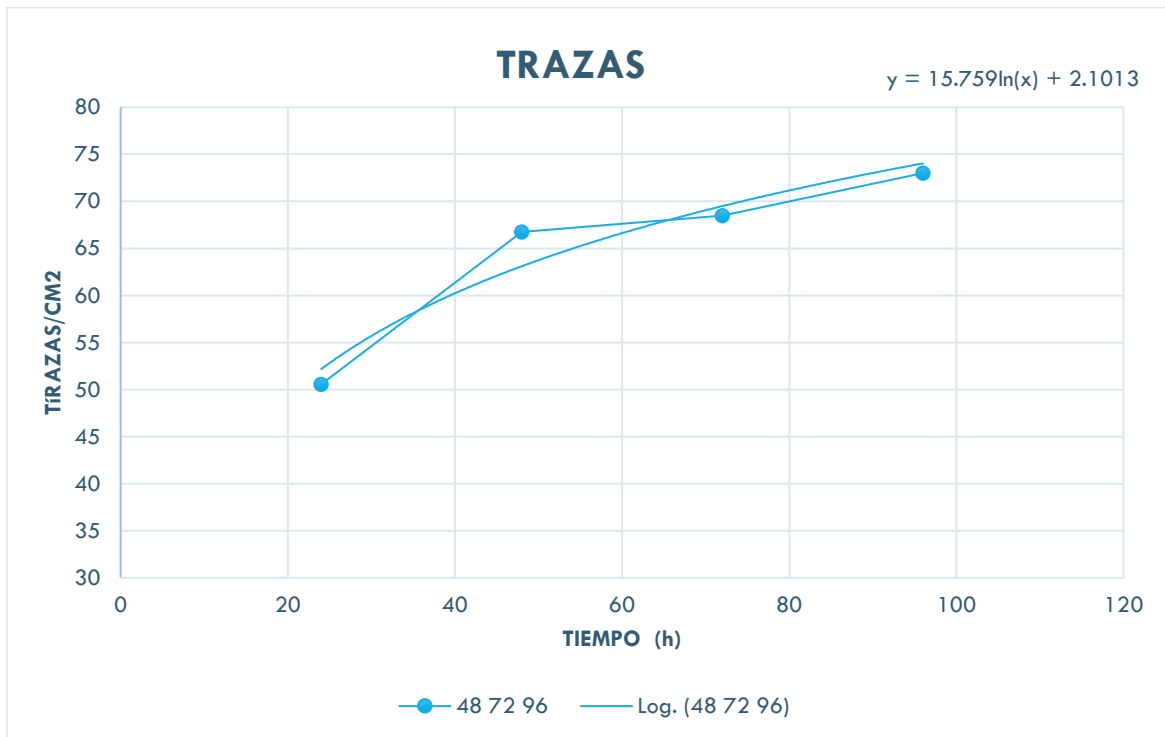
Coeficiente de Correlación de Pearson entre control y expuesto					
Variable(1)	Variable(2)	n	Pearson	p-valor	
control	control	4	1.00	<0.0001	
control	expuesto	4	-0.15	0.8540	
expuesto	control	4	-0.15	0.8540	
expuesto	expuesto	4	1.00	<0.0001	
Coeficientes de Correlación de Pearson entre manchas y trazas					
Variable(1)	Variable(2)	n	Pearson	p-valor	
Trazas reveladas	Trazas reveladas	4	1.00	<0.0001	
Trazas reveladas	Manchas Reveladas	4	0.69	0.3102	
Manchas Reveladas	Trazas reveladas	4	0.69	0.3102	
Manchas Reveladas	Manchas Reveladas	4	1.00	<0.0001	

También se presenta el coeficiente de correlación entre trazas y manchas, porque no se sabe si su presencia se debe a la misma variable.

Se realizó una gráfica 3.1 Tiempo en horas / Trazas en cm², se eliminó el primer valor de 24 h, porque se dudó de su precisión.

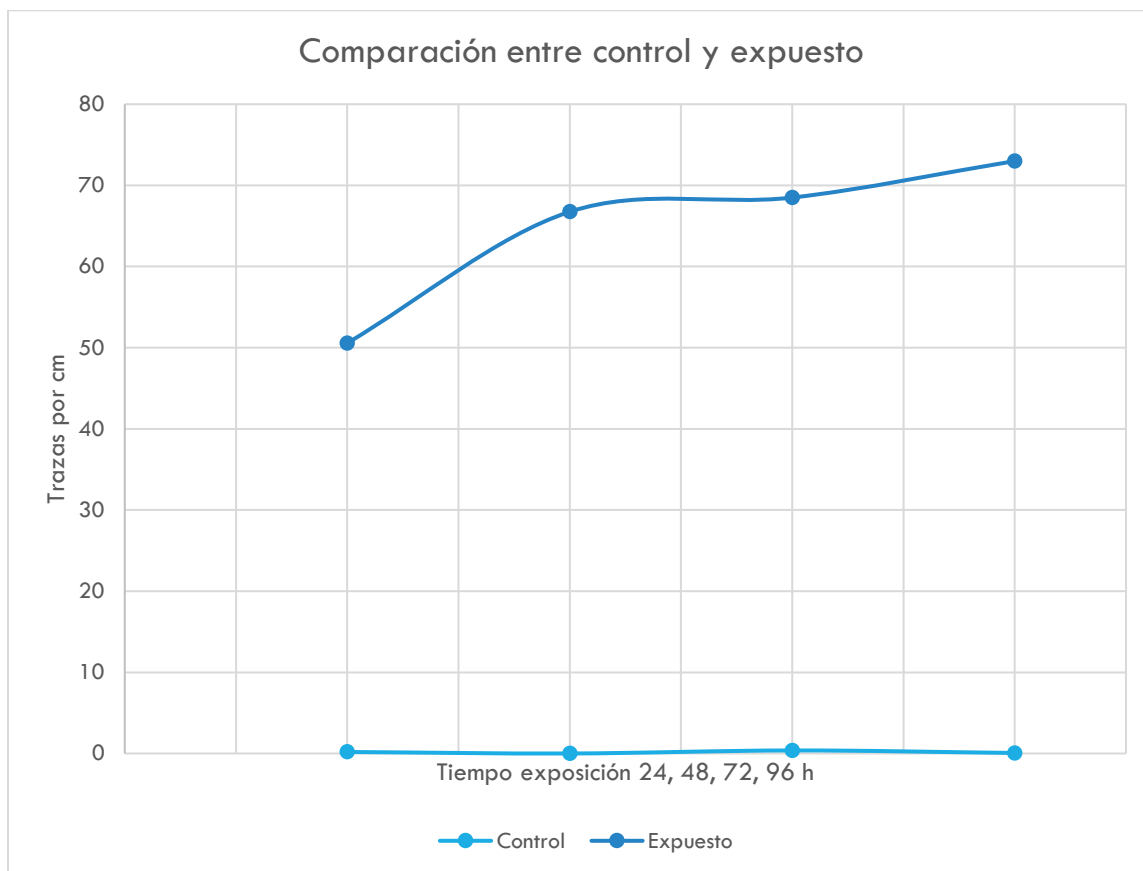
Realizó un ajuste.

Gráfica 3. 1 Tiempo en horas / Trazas en cm²



En la gráfica 3.2 de comparación se puede observar que los valores control van por debajo de los valores de exposición.

Gráfica 3. 2 Control y expuesto contra tiempo.



Exposición en Campo

Tabla 3. 5 Resultados de exposición en campo

Localidad	Número de trazas nucleares por cm ²	RAD 7 Fluctuaciones por minuto	EDA 200 Cuentas por minuto	pH	Temperatura	Sólidos Disueltos	Conductividad Eléctrica
Mina de San Antonio	ND	0.14	12	NA	NA	NA	NA
Unidad Habitacional	ND	0.4	46	NA	NA	NA	NA
Las Cascadas	15	NA	18	5.8	14.6° C	71 ppm	145 MS
Tonatico	11.5	NA	15	6.56	32 °C	SAT	SAT

ND: No detectado

NA: No aplica

SAT: Saturado

Las placas de CR39 no presentaron valores porque el tiempo de exposición en campo no fue el adecuado.

Análisis en ICP

- El mineral de Uranio de Coahuila posee 10.17 % de Uranio
- El biopolímero control no presentó niveles detectables de Uranio.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Desarrollo del biopolímero

Prueba 1:

- La consistencia era muy inestable, no resultó buena la proporción quelato/agua.
- Se contaminó con Hongos y Bacterias a pesar de ser expuesta al vacío.

Prueba 2:

La solución propuesta para evitar contaminación por hongos fue el uso de un antibiótico de amplio espectro

- Se vertió en el molde, pero las partículas suspendidas permanecieron.
- Al enfriar, no se podía distinguir si había un daño o no por las partículas.
- La tinción tampoco era visible, ya que el excipiente no se teñía.
- Pero no hay hubo contaminación por microbios.

Prueba 3

- No se contaminó con hongos pero el grosor y el teñido que da el yodo provocaban que no fuera una vista óptima.
- Poco estable al manipularse.

Prueba 4

- Es resistente, y en las pruebas a intemperie no muestra contaminación bacteriana.
- Maestro de la formación de gran cantidad de burbujas y la solidificación no es adecuada.

Prueba 5

- Se observó opalescencia por lo que la cuantificación de las trazas fue difícil.

- No se contaminó
- Mostró nula resistencia debido a su alta fragilidad.
- Se repitió el proceso usando grenetina, cambiando la forma de preparación y el molde, porque el manejo al cortar alteraba mucho los resultados.

Prueba 6

- Se dejó enfriar y antes de la solidificación, se añadió el yodo; las cajas petri de 60 mm x 15 mm ya estaban preparadas, (porque son estériles) para recibir la grenetina en un volumen de 10 mL cada una aproximadamente (las cajas poseen una seña a los .4 cm de alto), se preparó mezcla para 8 cajas

Prueba 7

- La resistencia fue óptima, y no se derritió ni se contaminó, ya que al disolver con una temperatura menor no se afecta la propiedad gelatinizante de la grenetina.

Prueba 8

- Se hizo un cambio en la forma de calentar y en la concentración debido a que no había evaporación durante el calentamiento.
- La grenetina en polvo, se colocó en un recipiente de boca ancha, se le añadió el agua con el yodo previamente disuelto, se dejó hidratar durante 1 minuto y se metió al microondas durante 40 segundos.
- Una vez líquida se pasó de inmediato a las cajas Petri para evitar que comenzara a cuajarse.
- Para mejorar el transporte del biopolímero, las cajas Petri con biopolímero estéril y tapadas, se metieron en un recipiente con tapa hermética, los huecos se rellenaron con papel estraza para evitar que las cajas se movieran y se destaparan.

Pruebas de exposición del material al radón

Prueba 1

- Se desarrollaron hongos porque no era un medio estéril y no estaba al vacío, solo estaba cerrado herméticamente.

Prueba 2

- La proporción quelato-agua no era resistente y el embudo resultaba muy estrecho para introducir los biopolímeros, además de que no estaba libre de humedad

Prueba 3

- A pesar de liberar de la humedad al embudo el biopolímero aportaba humedad en el ambiente, las sales de Uranio son muy delicadas por el grado de pureza que poseen y al hidratarse se deshacían.

Prueba 4

- Se hizo una prueba extra para descartar por completo el uso de sales de Uranio.

Prueba 5

- Con el mineral de Uranio ya no hubo problemas de hidratación, se realizó el conteo, pero la manipulación era complicada debido a la boquilla estrecha del embudo.

Prueba 6

- Para evitar la manipulación del biopolímero se vertió la mezcla en cajas Petri, se introdujeron en un desecador.

Prueba 7

- No se presentaron problemas, el biopolímero muestra un buen efecto en condiciones de laboratorio.

Prueba 8

- La última fórmula del biopolímero también demostró un efecto apropiado en condiciones de laboratorio.

Exposición del detector de biopolímero en campo

Prueba 1

- La formulación y la forma de traslado no resultó adecuada, por ende el efecto no fue detectado en los biopolímeros.
- El biopolímero no resistió las altas temperaturas.

Prueba 2

- El detector fue más resistente porque las temperaturas eran más altas pero la fórmula y el empaque para su traslado resultaron adecuados.

Pruebas de tejido expuesto al radón

El efecto de la radiación por partículas α se puede apreciar en el tejido del alveolo, tráquea y ligeramente en la superficie pulmonar. El centro del tejido pulmonar presenta muchas variaciones en su orografía. No se puede asegurar que sea daño por partículas α .

El motivo del presente trabajo es demostrar que el tejido del pulmón presenta daños por partículas alfa pero su cuantificación es complicada, *in vivo* es necesario realizar una biopsia, y siendo así la cuantificación no garantiza que sea precisa.

Además, como dosímetro el tejido del pulmón de cerdo se contamina y no puede transportarse. El biopolímero diseñado puede detectar y cuantificar la radiación ionizante sin ningún problema.

Respuesta del biopolímero a las partículas alfa del ^{222}Rn

Para obtener el efecto de mineral de U 10.17% en el biopolímero se realizaron cuatro exposiciones, 24 h, 48 h, 72 h, 96 h.

Los grupos controles presentaron valores < 1 de trazas nucleares. En las Figuras 3.12, 3.13, 3.14 y 3.15 se puede observar el biopolímero revelado.

Y en la tabla 3.1 se presenta el promedio de trazas nucleares por repetición y por cm^3 .

Los biopolímeros expuestos si presentaron efecto por trazas nucleares, en las Figuras 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19 se observan los efectos. En un círculo rojo se presentan los impactos de la radiación α , también se presentaron unas manchas blancas (círculos amarillos), que se consideró podrían influir en el efecto, para descartar, se realizó un coeficiente de correlación entre las manchas y trazas, en la tabla 3.4 se puede observar que el coeficiente de correlación entre trazas y manchas es de 0.69, así que se optó por descartarlas.

En la correlación entre el control y expuesto es negativa (Tabla 3.4 y Gráfica 3.2).

Análisis con ICP

El biopolímero no presenta niveles detectables de Uranio.

Exposición en campo

Los biopolímeros llevados a la mina y a la unidad habitacional no resistieron las altas temperaturas del traslado, sin embargo se contemplan los análisis con los otros equipos para futuras referencias. Cuando se realizó una modificación en la fórmula, los biopolímeros en las zonas con aguas termales si resistieron.

El efecto que se encontró en este trabajo, es decir una ionización en las células se vincula con los trabajos realizados por Rout et al., 2014, en donde se estudió el flujo del radón inhalado y con el de Vargas Trassierra et al., 2016. En el que se considera el efecto del tamaño del aerosol. Ambos trabajos, presentan o indican el efecto que en esta investigación se consideraron ya que en un trabajo previo Juárez et al., 2014 (que sirvió de base) se observó que la cuantificación de radón varía en el flujo de aire que arrastra al radón, el tiempo y la humedad.

CONCLUSIONES

- A) Con el trabajo experimental realizado se comprobó que el daño en el tejido del sistema respiratorio por partículas alfa provenientes del ^{222}Rn existe y es visible microscópicamente. Esto indica una alta ionización, la cual es responsable de la alteración celular produciendo el cáncer de pulmón.
- B) El biopolímero encontrado que presenta la mejor respuesta y las propiedades adecuadas para la manipulación es la mezcla empleada con base grenetina y yodo.
- C) El biopolímero propuesto puede ser empleado como dosímetro, porque es buen fijador de las partículas alfa y facilita el revelado de las trazas nucleares. Además facilita su identificación y conteo mediante óptica convencional.

Recomendación

Este material puede ser mejorado con la adición de agentes dopantes, sin embargo esta parte es para una investigación futura.

BIBLIOGRAFÍA

- Akerblom, G. (1999). Radon legislation and national guidelines Swedish Radiation Protection Institute. SSI report, 99-18.
- Alpen, E. (1998). *Radiation biophysics*. 1st ed. San Diego, California: Academic Press.
- Andreev, S.V y Selenezkaya, V.S. (1989). Hormesiskonzeption in Rahmen des problems der stimulierenden Wirkung von geringen Dosen chemisch-physikalischer Reize. *Fragen d. Kuurortwissenschaft, Physiotherapie u. Heilbanderkultur*, 6, pp. 78-75.
- Andrews, H. (1961). *Radiation biophysics*. 1st ed. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Attix, F. (1986). *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. 1st ed. New York: Wiley, p.113.
- Aulton, M. (2004). *Farmacía*. 1st ed. Madrid: Elsevier, p.55.
- Baird, C. (2016). *Química ambiental*. 4th ed. Barcelona: Reverté, p.622.
- Barbosa-Lorenzo, R., Ruano-Ravina, A., Caramés, C. S. y Barros-Dios, J. M. (2015). Radón residencial y cáncer de pulmón. Un estudio ecológico en Galicia. *Medicina Clinica*, 144, pp. 304-308
- Belcher, R. (1973). The application of chelate compounds in analytical chemistry. *Pure and Applied Chemistry*, 34, pp. 13-28
- Bragg, W. y Kleeman, R. (1905). XXXIX. On the α particles of radium, and their loss of range in passing through various atoms and molecules. *Philosophical Magazine Series 6*, 10, pp.318-340.
- Carvalho, I., Cidu, R., Fanfani, L., Pitsch, H., Beaucaire, C. y Zuddas, P. (2005). Environmental Impact of Uranium Mining and Ore Processing in the Lagoa Real District, Bahia, Brazil †. *Environmental Science & Technology*, 39, pp.8646-8652.
- Chen, J., Moir, D. and Whyte, J. (2012). Canadian population risk of radon induced lung cancer: a re-assessment based on the recent cross-Canada radon survey. *Radiation Protection Dosimetry*, 152, pp.9-13.
- Chen, Z., Wang, D., Gu, C., Liu, X., Pei, W., Li, J., Cao, Y., Jiao, Y., Tong, J. y Nie, J. (2015). Down-regulation of let-7 microRNA increased K-ras expression in lung damage induced by radon. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 40, pp.541-548.
- Choi, H. y Mazzone, P. (2014). Radon and lung cancer: Assessing and mitigating the risk. *Cleveland Clinic Journal of Medicine*, 81, pp.567-575.

Darby, S. (2005). Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*, 330, pp.223-0.

Deetjen, P. (1997). Epidemiology and biological effects of radon. En: H.G. Pratzel y P. Deetjen, *Radon in kurortmedizin*, pp. 33-39

Di Leva, G. y Croce, C. M. (2010). Roles of Small RNAs in tumor formation. *Trends Molecular Medicine*, 16, pp.257-267

Durán, M. T., Ravina, A. R., Lamelas, I. P., Fernández, V. L., Arca, J. A., Martínez, C. M., Álvarez, C. P., Barcala, F. J., Añón, O. C., y Gómez, A. G. (2014). Residential radón and lung cáncer histological types in never smokers. *European Respiration*, 44, pp. 2736

Durrani, S. A., y Ilic, R. (1997). *Radon measurements by etched track detectors: applications in radiation protection*. Earth sciences and the environment. Singapore: World Scientific. p.387.

Durrige.com. (2017). *DURRIDGE Company Inc. | Products | RAD7*. [online] Disponible en: http://www.durrige.com/products_rad7.shtml [Acceso 9 de Enero del 2017].

Eappen, K., Mayya, Y., Patnaik, R. y Kushwaha, H. (2006). Estimation of radon progeny equilibrium factors and their uncertainty bounds using solid state nuclear track detectors. *Radiation Measurements*, 41(3), pp.342-348.

Espinosa G. y Gammage R. B., (1990). Radon Levels Inside Residences in Mexico City. *Radiation Protection Dosimetry*, 34, pp. 183-185

Espinosa G. y Gammage R. B., (1993). Measurement methology for indoor radon using passive track detectors. *Appl. Radiat. Isot.*, 44, pp. 179-723

Espinosa, G. (1994). *Trazas Nucleares En Sólidos*. Ciudad de México, México: Instituto de Física UNAM. p. 113

Espinosa, G. y Gammage, R. (2011). An Indoor Radon Survey in Three Different Climate Regions in Mexico, and the Influence of Climate in the Obtained Values. *Journal of Environmental Protection*, 02(09), pp.1143-1148.

Espinosa, G. y Gammage, R. B. (1999). Radon distribution inside dwellings in Mexico. *Radiation Protection Dosimetry*, 85, pp. 325-327

Espinosa, G., Gamboa, I. y Golzarri J. (1987). El CR-39 como dosímetro de muy altas dosis de radiación gamma. XXX Congreso Nacional de Investigación en Física, Mérida Yucatán.

Espinosa, G., Golzarri, J., Angeles, A. and Griffith, R. (2009). Nationwide survey of radon levels in indoor workplaces in Mexico using Nuclear Track Methodology. *Radiation Measurements*, 44(9-10), pp.1051-1054.

Ferlay, J., Parkin, D. y Steliarova-Foucher, E. (2010). Estimates of cancer incidence and mortality in Europe in 2008. *European Journal of Cancer*, 46(4), pp.765-781.

Filipowicz, W., Bhattacharyya, S. y Sonenberg, N. (2008). Mechanisms of post-transcriptional regulation by microRNAs: are the answers in sight?. *Nature Reviews Genetics*, 2008(2), pp.102-114.

Fisica.unam.mx. (2015). Nuclear Tracks in polymers. [online] Disponible en: <http://www.fisica.unam.mx/personales/espinosa/img/research/research3b.jpg> [Accessed 8 Sep. 2016].

Fleischer, R. L., Price, P. B. y Walker, R. (1965). Solid State Track Detectors: Applications to nuclear science and Geophysics. *Ann. Rev. Nuc. Sci.*, 15, pp. 1-28

Gallardo, M., Jiménez, R., y Solazar, A. I. (1986). Equipo básico para revelado y detección de trazas nucleares en detectores de estado sólido. *Ciencia y tecnología*, 10, p. 55.

Gammage, R.B. y Espinosa G. 1997. Digital imaging system for Nuclear Track measurements. *Radiation Measurement*, 28, pp. 835-838

Garzón, G. (2006). *El gas radón y la homesis*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, pp. 73-87

Henshaw, D., Eatough, J. y Richardson, R. (1990). Radon as a causative factor in induction of myeloid leukaemia and other cancers. *The Lancet*, 335(8696), pp.1008-1012.

Herbello Hermelo, P. (2007). *Especiación de metales pesados mediante formación de quelatos*. 1st ed. Santiago de Compostela: Universidade de Santiago de Compostela, Servizo de Publicacións e Intercambio Científico, p.18.

Hinojo Alonso, N. A., Hernández Silva, G., Martínez Reyes, J. y Kotsarenko, A. (2009). Aspectos preliminares de mercurio y gas radón en la zona mineralizada en municipio de San Joaquín Qro. Seminario José Gregorio Solorio Murguía. Querétaro, pp. 26-33.

Hinojo Alonso, N.A., Kotsarenko, A., Yutis, V., Hernández Silva, G., Perego, P., Fazio, M., Grimalsky, V., Koshevaya, S., Foglia, F., Cortés Silva, A., García Martínez, R., Martínez Reyes, J., Norini, G. y Gropelli, G. (2013). Environmental and indoor study of Radon concentration in San Joaquin área, Queretaro, México, first results. *Radiation Measurements*, 50, pp.149-153

Hueck, W. (1939). Kurzer Bericht uber die Ergebnisse natomisher Untersuchungen in Schneeberg. *Z. Kerbsforsch*, 47, p.108

ICRP (International Commission on Radiological Protection). (2009). Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. *Annals of the ICRP* 23 (2). Pergamon Press, Oxford. ICRP, 2009. Protection against radon at home and at work. *Ann. ICRP* 65 (4), 5.

ICRP, (1994). International Commission on Radiological Protection, Protection against Radon-222 at home and at work, Publication 65, Annals of the ICRP volume 23/2

Jemal, A., Bray, F., Center, M., Ferlay, J., Ward, E. y Forman, D. (2011). Global cancer statistics. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 61(2), pp.69-90.

Juárez, F., (2014). Estudio de ^{222}Rn en Intramuros Mediante Detectores de Trazas Sólidos, Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma del Estado de México.

Kavasi N., Kovacs T., Nemeth C., Szabo T., Gorjanacz Z., Varhegyi A., Hakl J. y Somlai J. (2006). Difficulties in radon measurements at workplaces. *Radiation Measurement*, 41, pp. 229-234

Kendall G. M., Green B. M. R., Miles J. C. H. y Dixon D. W. (2005). The development of the UK radon program. *J. Radiol. Prot.*, 25, pp. 475-492

Khan A. J., Tyagi R. K. y Prasad R. (1989). Study of airborne radón levels inside buildings. *Nucl. Tracks Radiation Measurement*, 16, pp. 23-27

Kitto, M., Torres, M., Haines, D. y Semkow, T. (2014). Radon measurement of natural gas using alpha scintillation cells. *Journal of Environmental Radioactivity*, 138, pp.205-207.

Kreienbrock, L., Kreuzer, M., Gerken, M., Dingerkus, G., Wellmann, J., Keller, G. and Erich Wichmann, H. (2001). Case-Control Study on Lung Cancer and Residential Radon in Western Germany. *American Journal of Epidemiology*, 153(1), pp.42-52.

Krewski D., Lubin J. H., Zielinski J. M., Alvanja M., Catalan V. S. y Field R. W. (2005). Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies, *Epidemiology*, 16, pp. 137-145

Lagarde, F., Axelsson, G., Damber, L., Mellander, H., Nyberg, F. and Pershagen, G. (2001). Residential Radon and Lung Cancer among Never-Smokers in Sweden. *Epidemiology*, 12(4), pp.396-404.

Long, M., Deng, H., Tian, G., Song, C., Liu, H., Shen, Y. y Lv, C. (2016). A novel detection of radon based on its decay product inducing conformational changes of an aptamer probe. *Analytica Chimica Acta*, 936, pp.202-207.

López, AD., Mathers, CD., Ezzati, M., Jaminson DT. y Murray, CJI. (2006). Global burden of disease and risk factors. Disease Control Priorities Project. Washington, D. C.: World Bank.

Ma, J., Yonehara, H., Ikebuchi, M. y Aoyama T. (1996). Effect of radon exposure on superoxide dismutase (SOD) activity in rat. *Journal of Radiation Research*, 37, pp. 12-19

Maina, J. (2002). *Functional morphology of the vertebrate respiratory systems*. 1st ed. Enfield, NH: Science Publishers.

Malvezzi, M., Bertuccio, P., Levi, F., La Vecchia, C. y Negri, E. (2013). European cancer mortality predictions for the year 2013. *Annals of Oncology*, 24(3), pp.792-800.

Moosakhani, A., Parvin, P., Majdabadi, A. y Hashemi M.m. (2016). Radon decay monitoring in air using characteristic emission of species in metal-assisted LIBS. *Radiation Measurements*, 92, pp. 39-48

Navarro Lizandra, J. (2000). *Maquetas, modelos y moldes*. 1st ed. Castelló Plana: Universitat Jaume I, p.237.

Pérez-Ríos M., Barros-Dios J. M., Montes-Martínez A., y Ruano-Ravina A. (2010). Attributable mortality to radón exposure in Galicia, Spain. Is It necessary to act in the face of this health problema? . *BMC Public Heatl.*, 10, p. 256

Petechuk D., (2004). *The Respiratory Sistem, Human Body Systems*. Greenwood: Press USA pp. 100

Price, P. B. y R.M. Walker (1962). Electron microscope observation of etched tracks from spallation recoils in mica. *Phys. Rev. Letters*. 8, pp.217-219

Quindós, L.S., Soto, J., Fernández, P.L., Villar, E., Newton, G., Peña, J.J., Gálvez, M. y Arceche, J. (1989). Radón, principal fuente de radiación natural. *Revista Española de Física*, 2, pp. 22-27

Rajesh, T., Hui Min, C., Jenette, C., Berwin, A. T. y Gary Lee Y. C. (2016). Longitudinal Measurement of Pleural Fluid Biochemistry and Cytokines in Malignant Pleural Effusions. *CHEST* 149, pp.1494-1500

Rajewsky, B. (1940). Bercht uber die Schneeberger Untersuchungen. *Z Kerbsfosch*, 49, p. 315.

Raya R., (1985). Optimización del espectro de energías de los fragmentos de fisión del Cf-252 con detectores de trazas en estado sólido. Tesis para obtener el título de físico (Dirección: G. Espinosa) FCUNAM

Ribera, D., Labrot, F., Tisnerat, G. y Narbonne Jf. (1996). Uranium in the environment: occurrence, transfer and biological effects *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 146, pp. 53-89

Richardson, R., Eatough, J. y Henshaw, D. (1991). Dose to red bone marrow from natural radon and thoron exposure. *The British Journal of Radiology*, 64(763), pp.608-624.

Rickards, J., Golzarri, J. y Espinosa, G. (2010). A Monte Carlo study of radon detection in cylindrical diffusion chambers. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101(5), pp.333-337.

Rout, R., Mishra, R., Sapra, B. and Mayya, Y. (2014). "Deposition-flux to lung dose" – a new approach in radon inhalation dosimetry using wire-mesh capped direct radon progeny sensor. *Journal of Environmental Radioactivity*, 138, pp.101-105.

Salgado-Espinosa, T., Barros-Dios, J.M. y Ruano-Ravina, A. (2015). Radon exposure and oropharyngeal cancer risk. *Cancer Letters*, 369, pp. 45-49

Schmidt, A., Schlueter, M., Melles, M. and Schubert, M. (2008). Continuous and discrete on-site detection of radon-222 in ground- and surface waters by means of an extraction module. *Applied Radiation and Isotopes*, 66(12), pp.1939-1944.

Segovia, N. (1978). Trazas nucleares en vidrio. México: FCUNAM. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias (Física). Universidad Nacional Autónoma de México

Seymour, R. and Carraher, C. (1995). *Introducción a la química de los polímeros*. 1st ed. Barcelona: Reverté.

Shi, Z.H., Dou, T. J., Zhang, H., Huang, H. X. y Zeng H. (2016). Electrokinetic Remediation of Uranium Contaminated Soil by Ion Exchange Membranes. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 10, pp. 1093-1097

Skoog, D., West, D., Holler, F. and Berenguer Navarro, V. (1996). *Fundamentos de química analítica*. 1st ed. Barcelona: Reverté, p.783.

Stojanovska, Z., Zunic, Z., Bossew, P., Bochicchio, F., Carpentieri, C., Venoso, G., Mishra, R., Rout, R., Sapra, B., Burghel, B., Cucu-Dinu, A., Boev, B. and Cosma, C. (2014). Results from time integrated measurements of indoor radon, thoron and their decay product concentrations in schools in the Republic of Macedonia. *Radiation Protection Dosimetry*, 162(1-2), pp.152-156.

Sun, S., Schiller, J. H., y Gazdar, A. F. (2007), Lung cancer in never smokers – a different disease. *Nat. Rev. Cancer*, 7, pp. 778-790

Suzuka, I., Yamaoka K. y Komoto Y. (1991). Adrenal secretion of catecholamines by inhalation of radon water in relation to an increase of the tissue perfusion rate in rabbits. *Journal of Japanese Coll Angiology*, 31, pp.1182-1196

Tommasino, I., Zapparoli, G. y Griffith, R.v. (1979). Electrochemical Etching-I Mechanism In. Proc. 10 th Int. Conf. on SSNTD. Lyon. *Nuclear Tracks*, 2, pp. 413-423

Torres-Durán, M., Barros-Dios, J., Fernández-Villar, A. and Ruano-Ravina, A. (2014). Residential radon and lung cancer in never smokers. A systematic review. *Cancer Letters*, 345(1), pp.21-26.

Tortora, G. and Derrickson, B. (2006). *Principios de anatomía y fisiología*. 11th ed. México: Editorial Médica Panamericana.

UNCEAR (United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation), (2000). Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to General Assembly), United Nations, pp. 107-108. Annexure B.

USEPA, (2004). US EPA, Environments Division. A Citizen's guide to radon: the Guide to protecting yourself and your family for radon. Washington, DC. US EPA 402-K-02-006

Vasudeva, R. (2017). *Intestinal Radiation Injury: Background, Pathophysiology, Etiology*. [online] Emedicine.medscape.com. Available at: <https://emedicine.medscape.com/article/180084-overview> [Acceso 13 Agosto 2017].

Wichmann, H., Heinrich, J., Gerken, M., Kreuzer, M., Wellmann, J., Keller, G. and Kreienbrock, L. (2002). Domestic radon and lung cancer—current status including new evidence from Germany. *International Congress Series*, 1225, pp.247-252.

WHO (World Health Organization). WHO handbook on indoor radon: A public health perspective. Geneva, Switzerland: World Health Organization: (2009).

Xu, N., Zhang, S., Nie, J., Li, J. y Tong, J. (2008). Radon-Induced Proteomic Profile of Lung Tissue in Rats. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 71(6), pp.361-366.

Young, D. (1958). Etching of Radiation Damage in Lithium Fluoride. *Nature*, 182(4632), pp.375-377.

ANEXOS

GLOSARIO

Actinio: Elemento químico de símbolo Ac y número atómico 89, pertenece al grupo IIIB, periodo 7 y bloque F de la tabla periódica de los elementos. Es una de las tierras raras y da nombre a una de las series, la de los actínidos. Es un metal radiactivo blando que reluce en la oscuridad. Se conocen los isótopos con número másico entre 209 y 234, siendo el más estable el ^{227}Ac que tiene una vida media de 21,7 años. El ^{227}Ac se encuentra en el uranio natural en una proporción del orden del 0,175% y el ^{228}Ac también se encuentra en la naturaleza

ADN: El ácido desoxirribonucleico o ADN es una molécula larga, parecida a una cuerda, compuesta usualmente por dos filamentos, cada uno de ellos enroscado en torno al otro formando una doble hélice. Cada filamento de la hélice de ADN está formado por nucleótidos unidos entre sí para formar una cadena que se llama polinucleótido. Cada nucleótido consta de tres partes: Una base nitrogenada, puede ser una purina (adenina A o guanina G), o bien una pirimidina: citocina C o timina T (en el caso del ADN) y uracilo U (en el ARN); una azúcar con cinco carbonos (pentosa) llamado desoxirribosa; una molécula de fosfato (ácido fosfórico). Es la sustancia química responsable de la transmisión de la información hereditaria. Es el constituyente de los cromosomas de las células, en su estructura se codifica la información para la síntesis de todas las proteínas celulares. Discretos segmentos del ADN o del centrosoma son los genes, que codifican cada una de las proteínas. La información se transmite de célula a célula por causa de la replicación del ADN.

Biopolímero: Macro molécula sintetizada mediante algún proceso biológico, las proteínas, el ADN y los polisacáridos son los polímeros más importantes. Algunos ejemplos son: exudados de plantas (árabiga, karaya, tragacanto), extractos de algas marinas (agar, alginatos, carrageninas), semillas (guar, tamarindo), cereales (almidones), de origen animal (gelatinas, albúminas, casinatos) y de origen microbiano (dextrana y xantana).

Bq (Becquerel): Es la unidad de cantidad de material radiactivo, no la radiación emitida por dicho material. Es la cantidad de radiactividad en la que un núcleo se desintegra en cada segundo (1 d/s= 1Bq). En los materiales radiactivos suelen utilizarse cantidades de megabecquerels (MBq). La radiactividad y el becquerel no se asocian con los rayos X.

Cadena de decaimiento radiactiva: Series de nucleidos en la que cada miembro se transforma en el siguiente por desintegración radiactiva hasta llegar a un nucleido estable.

Cáncer: Del griego: cangrejo, es una neoplasia o tumor maligno. Se utiliza para denominar un grupo de enfermedades en las cuales el organismo produce un exceso de células malignas con rasgos típicos de comportamiento y crecimiento descontrolado. La célula cancerosa “olvida” la capacidad de morir y se divide casi sin límite.

Colágeno: Es una proteína esencial en la formación del tejido conectivo (tejido de soporte

Constante de decaimiento radiactivo: Constante de proporcionalidad definida por $\lambda = A/N_B$ donde A es la actividad de la especie radiactiva y N_B el número de partículas B desintegradas en la unidad de tiempo. Representa la probabilidad de una desintegración nuclear en un intervalo de tiempo dividida por dicho intervalo de tiempo.

Contaminación radiactiva: Contaminación por sustancias radiactivas de cualquier material, superficie o medio, o de una persona. En el caso particular del cuerpo humano, dicha contaminación radiactiva comprenderá a la vez la contaminación cutánea externa y la contaminación interna, independientemente de la vía de incorporación.

Desintegración Radiactiva: Modificación sufrida por un núcleo, que le transforma en otro o en varios otros núcleos o partículas de emisión de energía. Esta transformación puede ser espontánea o provocada por un núcleo o una partícula.

Densitometría: Técnica que permite valorar la composición mediante la medición de densidades.

Dosis: Cantidad de sustancia ingerida, en una sola toma.

Energía Cinética: Trabajo que un sistema material en movimiento está realizando, cuando al realizar dicho trabajo su velocidad disminuye hasta cero.

Enzima intracelular: Enzima producida por una célula y no se excreta al medio circundante. Cumple su función en el interior de la célula.

Enzima: Catalizador biológico producido por un organismo.

Epigenética: Rama de la genética que estudia la interacción de los genes con el tiempo y el ambiente, para hacer posible el desarrollo.

Cintilómetro: Contador de centelleos.

Etiológico: Agente responsable del efecto dado.

Familia radiactiva: Una de las cuatro series de nucleidos radiactivos en la que cada uno de sus términos se deduce del precedente por desintegración nuclear espontánea, cuyos padres nucleares son, respectivamente el torio 232, el neptunio 237, el uranio 238 y el uranio 235. Cada serie termina en un producto estable.

Fondo radiactivo: Valor que se obtiene en una medida de radiactividad, debido a la cuenta que aporta el propio medio ambiente.

Genético: Asociado a herencia biológica.

Gen: Unidad de la información genética. Una serie de codones de tres nucleótidos que especifican la secuencia lineal de los aminoácidos en su producto polipeptídico.

Grenetina (gelatina): Es un biopolímero de origen animal, coloide gel; incoloro, traslúcido, quebradizo, insípido, compuesto en un 80% de proteína derivada de colágeno animal, obtenido durante la cocción de huesos, pieles y cartílagos.

Hematopoyesis: Proceso de creación de células sanguíneas nuevas. En la médula ósea hay unas células madre pluripotenciales que generan las distintas estirpes de células sanguíneas: los glóbulos rojos, los glóbulos blancos y las plaquetas.

Ionización: Proceso en el cual un átomo pierde electrones, para convertirse en un ión positivo o catión.

Isótopo estable: Es un isótopo que no emite radiaciones nocivas porque no sufren descomposiciones nucleares. Estos isótopos son químicamente idénticos al elemento natural, por lo que un compuesto enriquecido en un isótopo estable no presenta una toxicidad distinta al compuesto natural no enriquecido. Así, las sustancias “enriquecidas” con isótopos estables son absolutamente inocuas y se han utilizado como trazadores en seres humanos. El único inconveniente, es la dificultad de su determinación, que se lleva a cabo mediante espectrómetros de masas de gran complejidad.

Isótopos: Átomos que ocupan el “Mismo sitio” en la tabla periódica de los elementos, porque poseen el mismo número de protones y de electrones, pero poseen diferente número de neutrones en su núcleo y distinta masa atómica.

Leucemia: Es una enfermedad neoplásica que aparece como consecuencia de una proliferación no regulada y una modulación incompleta de precursores celulares de los tejidos hematopoyéticos y linfoides. En la médula ósea, las células tumorales desplazan al resto de series normales y posteriormente se diseminan a otros tejidos del organismo. La leucemia es el tumor maligno más frecuentemente en la infancia con un pico de incidencia entre los dos y ocho años de edad.

Melanoma: Es un tumor maligno derivado de los melanocitos y células névicas. Los melanocitos tienen su origen embriológico en el neuroectodermo, desde donde migran a la piel en etapas embrionarias precoces así como a los ojos y al tracto respiratorio e intestinal.

Micro RNA: Pequeños RNA no codificadores de 20 a 22 nucleótidos de longitud que participan en la regulación génica postranscriptiva. Se sugiere que los microRNA contribuyen a la tumorigénesis, a causa de su capacidad de regular las vías de señales oncógenas.

Moléculas bioactivas: Es un conglomerado no reticular de átomos, que se mantienen unidos por enlace químicos y tiene características específicas de actividad biológica e interfieren en procesos biológicos.

Neptunio: Elemento sintético de la tabla periódica cuyo símbolo es Np y su número Atómico es 93.

Neutrones: Partícula eléctricamente neutra, los neutrones son los constitutivos fundamentales del núcleo atómico y se les considera como dos formas de una misma partícula: el nucleón.

Partícula Alfa: Es un núcleo equivalente al Helio, con dos protones y dos neutrones enlazados entre sí, con spin total cero. La emisión alfa se presenta principalmente en núcleos que son demasiado grandes para ser estables. Es considerada como radiación ionizante.

Pooling: Es un término de gestión de recursos que se refiere a la agrupación de recursos con el fin de maximizar la ventaja.

Quelato: Un quelante, o secuestrante, o antagonista de metales pesados, es una sustancia que forma complejos con iones de metales pesados. A estos complejos se los conoce

como quelatos, palabra que proviene de la palabra griega chele que significa "garra", se compone por un anillo heterocíclico formado por un complejo metálico el cual generalmente ocupa la posición central y ligandos orgánicos (agentes quelantes) asociados al metal.

Radiación Beta: Es de dos tipos, porque hay electrones negativo o negatrón y electrón positivo o positrón. El positrón es idéntico al negatrón salvo que su carga es +1 en lugar de -1, cuando un núcleo radiactivo emite estos electrones se denominan partículas beta, es decir las dos partículas b- y b+ son iguales a e- y e+.

Radiactividad Natural: Radiactividad propia de ciertos nucleídos existentes en estado natural. La mayoría de estos nucleídos forman parte de una de las tres familias radiactivas naturales.

Radiactivo: Cuerpo cuyos átomos se desintegran espontáneamente.

Radio (elemento): Elemento químico de número atómico 88 y símbolo Ra.

Radiobiología: Ciencia que tiene por objeto el estudio de los efectos de las radiaciones sobre los seres vivos.

Radioisótopo (Isótopo radiactivo): Es el núcleo de un elemento que emite de forma espontánea una partícula alfa o una partícula beta.

Radioterapia interna: Es un tratamiento en el que la fuente de radiación se coloca dentro de su cuerpo (por ingestión o vía intravenosa). La fuente de radiación puede ser sólida o líquida.

Radón: Es un gas radiactivo generado naturalmente por la desintegración de los elementos radiactivos como: Uranio, Torio y Radio presentes en las rocas y en los suelos.

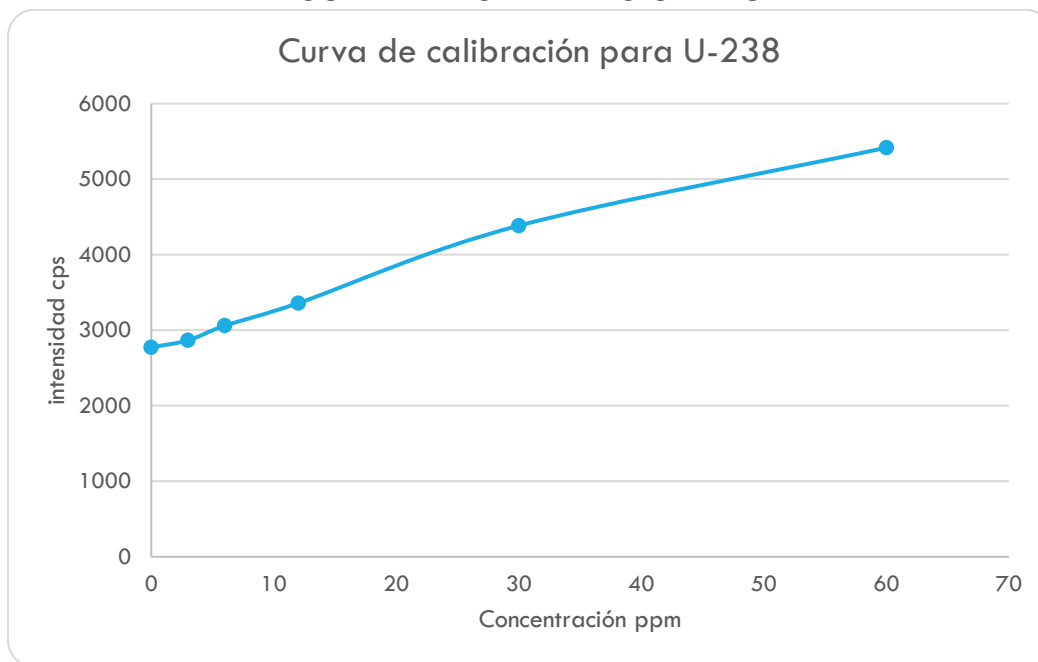
Traza nuclear: Huella estable formada por "centros de tensión" que responden a ataque químico, básicamente por desplazamientos atómicos.

Uranio Natural: Uranio de composición isotópica natural. Sus componentes son: ^{238}U (99.2830%), ^{235}U (0.7110%) y ^{234}U (0.0054%). Con esta composición se emplea como combustible en ciertos reactores térmicos llamados por ello de uranio natural. Es el material de alimentación para la producción de uranio enriquecido.

Uranio: Elemento químico metálico de color plateado-grisáceo de la serie de los actínidos, su símbolo químico es U y su número atómico es 92. Posee isótopos abundantes, ^{238}U y ^{235}U .

Vida media radiactiva: Tiempo necesario para que el número de átomos de una cierta especie se reduzca a la mitad por un proceso de desintegración radiactiva.

CURVA DE CALIBRACIÓN ²³⁸U



ICP (Espectrómetro de emisión de plasma acoplado inductivamente) óptico secuencial marca Perkin Elmer mod. 400 con configuración que permite el análisis de hidrocarburos directamente. Perteneciente al laboratorio de radiactividad natural del Instituto de Geofísica, UNAM.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Series de decaimiento $^{238}\text{Uranio}$ (Attix, 1986).....	9
Figura 1. 2 Heridas por radiación en intestino ocasionadas por radioterapia interna para tratar cáncer de próstata (Vasudeva, 2017).....	16
Figura 1. 3 Tracto respiratorio superior (Petechuk, 2004).	25
Figura 1. 4 Vista antero lateral de la porción externa de la nariz que muestra sus estructuras cartilaginosas y óseas (Tortora y Derrickson, 2006).	25
Figura 1. 5 Corte sagital del lado izquierdo de la cabeza y cuello que muestra la localización de las estructuras respiratorias (Tortora y Derrickson, 2006).....	26
Figura 1. 6 Ramificación de las vías aéreas desde la tráquea: el árbol bronquial (Tortora y Derrickson, 2006).....	28
Figura 1. 7 Diagrama de una porción de un lobulillo pulmonar (Tortora y Derrickson, 2006).	29
Figura 1. 8 Componentes celulares de un alveolo y detalles de la membrana respiratoria (Tortora y Derrickson, 2006).	31
Figura 1. 9 Intercambio gaseoso (Petechuk, 2004).	32
Figura 1. 10 Componentes estructurales de la barrera agua-sangre (Petechuk, 2004).....	33
Figura 1. 11 Grabado de trazas (Fisica.unam.mx. 2015).	40
Figura 1. 12 Trazas nucleares en polímeros (Espinosa, 1994).	41
Figura 1. 13 Detector electrónico de Radón RAD7 (durridge.com, 2017).....	43
Figura 1. 14 Espectro de energía Alfa (durridge.com, 2017).....	43
Figura 1. 15 EDA 200.....	44
Figura 2. 1 Diagrama del diseño experimental.	50
Figura 2. 3 Proceso y características del Biopolímero.	54
Figura 2. 4 Grenetina a baño María	56
Figura 2. 5 Tupper molde.....	56
Figura 2. 6 Superficie de biopolímero de la segunda prueba.	57
Figura 2. 7 Biopolímero con yodo y sin yodo.	57
Figura 2. 8 Biopolímero de Agar.....	58
Figura 2. 9 Baño maría con dos vasos.	59
Figura 2. 10 Cajas Petri con Biopolímero.	60
Figura 2. 11 Abatelenguas	62
Figura 2. 12 Embudos con abatelenguas.	63
Figura 2. 13 Embudos con sales de uranio y abatelenguas.	63
Figura 2. 14 Embudo de 1 L con biopolímero de agar.	64
Figura 2. 15 Embudo de 1 L con biopolímero de agar y tubo de ensayo con sales de Uranio.....	65
Figura 2. 16 Embudo de 1 L con mineral de Uranio y biopolímero.	66
Figura 2. 17 Embudo de 1 L con biopolímero y mineral de Uranio.	66
Figura 2. 18 Embudo con biopolímeros en abatelenguas y mineral de uranio.	67
Figura 2. 19 Embudo con abatelenguas por duplicado.....	68
Figura 2. 20 Cajas Petri estériles.	69
Figura 2. 21 Desecador con cajas petri (Blanco).	69

Figura 2. 22 Desecador con cajas Petri.....	70
Figura 2. 23 Biopolímero con mineral de Uranio en desecador.	71
Figura 2. 24 Desecador conectado a bomba de vacío, con biopolímeros revelados (azules) y biopolímeros en exposición	71
Figura 2. 25 Pulmón de cerdo fresco.....	72
Figura 2. 26 Tejidos (T-Tráquea, C- Pulmón centro, S- Pulmón superficie, A- alveolo).....	73
Figura 2. 27 Orden de exposición.	73
Figura 2. 28 Biopolímero y tejido en desecador con mineral de Uranio.....	74
Figura 2. 29 Placas de CR39.	75
Figura 2. 30 Placas de CR39.	76
Figura 2. 31 Detector biopolímero.....	76
Figura 2. 32 Detector EDA 200.	77
Figura 2. 33 Detector en las cascadas.....	78
Figura 2. 34 Revelado con KOH 6M.	79
Figura 2. 35 Biopolímero revelado con KOH arriba, biopolímero con azul de metileno abajo.....	80
Figura 2. 36 Disoluciones listas para revelar y vaso de residuos	81
Figura 2. 37 Cajas Petri teñidas y reveladas, listas para observar.	81
Figura 2. 38 Microscopio y biopolímero teñido.	82
Figura 2. 39 Observación de trazas en biopolímero	83
Figura 2. 40 Microscopio de campo con soporte, para observar biopolímero	83
Figura 2. 41 Equipo preparado para observar	84
Figura 2. 42 Teñido de tejido revelado y listo para observarse.	84
Figura 3. 1 Biopolímero con antibiótico.....	86
Figura 3. 2 Grenetina con yodo y sin yodo	87
Figura 3. 3 Biopolímero base Agar	88
Figura 3. 4 Abatelenguas en embudo de separación con sales de Uranio ligeramente hidratadas.....	89
Figura 3. 5 Embudo con biopolímeros en abatelenguas y mineral de uranio	90
Figura 3. 6 Desecador conectado a bomba de vacío, con biopolímeros revelados (azules) y biopolímeros en exposición.....	90
Figura 3. 7 Biopolímero en cajas Petri, dentro del desecador.....	91
Figura 3. 8 Tejido de alveolo expuesto.	92
Figura 3. 9 Centro del tejido pulmonar	93
Figura 3. 10 Tejido de superficie pulmonar.	93
Figura 3. 11 Tráquea expuesta a radón.	94
Figura 3. 12 Control 24 horas, revelado	95
Figura 3. 13 Control 48 horas, revelado	95
Figura 3. 14 Control 72 horas, revelado	96
Figura 3. 15 Control 96 horas, revelado	96
Figura 3. 16 Expuesto, 24 h.	98
Figura 3. 17 Expuesto, 48 h.....	99
Figura 3. 18 Expuesto, 72 h.....	99

Figura 3. 19 Expuesto 96 h	100
Figura 3. 20 Expuesto a cámara de Ionización Marca Eberline Modelo R0-5D, 5000 bq	101

ÌNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Material y Condiciones de Matriz.....	55
Tabla 2. 2 Desarrollo de curva de calibración.....	61
Tabla 2. 3 Exposiciones en campo.....	74
Tabla 2. 4 Revelado de trazas nucleares.	78
Tabla 2. 5 Observaciones en el biopolímero.	82
Tabla 3. 1 Promedio de trazas nucleares por repetición.....	97
Tabla 3. 2 Promedio del conteo de trazas reveladas en biopolímero expuesto a mineral de uranio.	102
Tabla 3. 3 Promedios, D.E., Valor mínimo y Valor máximo de biopolímero expuesto a mineral.....	103
Tabla 3. 4 Coeficiente de correlación de Pearson entre el control y el expuesto, coeficiente de correlación entre trazas y manchas.	103
Tabla 3. 5 Resultados de exposición en campo.....	106

ÌNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 3. 1 Tiempo en horas / Trazas en cm ²	104
Gráfica 3. 2 Control y expuesto contra tiempo.....	105