

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**



**PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE
CONCENTRACIONES DE GAS RADÓN (Rn^{222}), EN RECINTOS
CERRADOS Y ESTUDIOS AMBIENTALES APLICANDO
CENTELLEO LÍQUIDO**

PRESENTADO POR:

MAINOR STANLEY CÓRDOVA VÁSQUEZ

MOISÉS ELÍAS GÓMEZ MIGUEL

KAYLA REYES DE HENRRÍQUEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2021.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

DIRECTORA:

INGRA. SARA ELISABETH ORELLANA BERRÍOS

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:
INGENIERO QUÍMICO

Título:

**PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE
CONCENTRACIONES DE GAS RADÓN (Rn^{222}), EN RECINTOS
CERRADOS Y ESTUDIOS AMBIENTALES APLICANDO
CENTELLEO LÍQUIDO**

Presentando por:

**MAINOR STANLEY CÓRDOVA VÁSQUEZ
MOISÉS ELÍAS GÓMEZ MIGUEL
KAYLA REYES DE HENRRÍQUEZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores:

**INGRA. ANA CECILIA DÍAZ DE FLAMENCO
MSc. JULIO ERNESTO PAYÉS HERNÁNDEZ
LIC. JOSÉ RAMIRO RODRÍGUEZ CARPIO**

San Salvador, Febrero 2021.

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores:

INGRA. ANA CECILIA DÍAZ DE FLAMENCO

MSc. JULIO ERNESTO PAYÉS HERNÁNDEZ

LIC. JOSÉ RAMIRO RODRÍGUEZ CARPIO

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS DEL GRUPO:

Sin importar nuestras creencias religiosas tenemos muy claro que nuestro Padre Dios es el que nos ha permitido llegar a este momento de culminación de nuestra carrera con altas y bajas en el camino.

Un pilar fundamental en el correcto desarrollo y culminación de este trabajo de grado, han sido nuestros asesores Ingra. Ana Cecilia Díaz de Flamenco, MSc. Julio Ernesto Payes Hernández y Lic. José Ramiro Rodríguez Carpio quienes desde un primer momento siempre se mostraron dispuestos a ayudarnos. En este año donde hemos trabajado de una manera diferente nuestra tesis por la situación actual de pandemia, siempre nos ayudaron a encontrar soluciones a las situaciones que se presentaban.

Un agradecimiento inmenso a todos esos catedráticos de nuestra querida Universidad de El Salvador que contribuyeron en la acumulación del conocimiento necesario para avanzar en nuestra carrera. Con una mención especial a todos los docentes y personal de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, así como también a su directora Ingra. Sara Elisabeth Orellana Berríos, por todos sus conocimientos heredados tanto en lo académico como de sus experiencias en la vida profesional.

Al Laboratorio del Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares de la Facultad de Ingeniería Y Arquitectura de la Universidad de El Salvador y su Director Ing. Luis Ramón Portillo por la oportunidad de desarrollar la presente investigación y prestar sus instalaciones y equipo para el desarrollo de la prueba piloto.

Con estas pocas palabras, pero sinceras y de corazón casi podemos decir que somos: INGENIEROS QUÍMICOS.

AGRADECIMIENTOS

Estas son las palabras que más tiempo han esperado en mi vida para poder ser escritas, pero las que más deseaba plasmar en este documento, para reflejar el agradecimiento a aquellas personas que siempre confiaron en que algún día lo lograría y podría llegar a ser INGENIERO.

A lo largo de las pruebas que se han presentado siempre de una forma u otra aún en este año de pandemia que ha sido tan duro con tantas pruebas, el Creador nunca me ha dejado solo, y siempre me dió las fuerzas para seguir adelante para no rendirme en este camino, gracias Padre por estar siempre a mi lado.

Agradecerles a mis compañeros Moisés y Kayla por tenerme paciencia y el apoyo que me brindaron este año y a pesar de lo que nos costó, terminamos nuestra tesis con un excelente trabajo.

Además, en distintos momentos de mi vida he encontrado ángeles que nunca me han dejado solo e igualmente confiaron en mi persona, son 4 las mujeres que han marcado este camino. Sarah gracias por ser fuerte este año que ha sido muy duro para ti y confiar en que lo lograríamos. Agradecerle de todo corazón a la segunda madre que Dios me regaló, Vilma Amaya que siempre me ha aconsejado y ha acogido en su familia, brindándome su apoyo de cualquier manera. A mi hermana Laura que igualmente de una forma u otra me ha apoyado a lograr este objetivo, ¡Gracias hermana! A mi madre Margarita que ha sido el motor en este largo camino lleno de alegrías y tristezas, por confiar siempre en que lo lograríamos, lento, pero en el tiempo que Dios lo dispuso se cumplió el objetivo madrecita. A ustedes mujeres valientes y aguerridas les pertenece un pedacito de este título obtenido.

Finalmente agradecerles a todas esas personas que algún momento, aunque sea con palabras de aliento me han ayudado a hacerle frente a los momentos difíciles. ¡GRACIAS A TODOS!

Mainor Stanley Córdova Vásquez

AGRADECIMIENTOS

La perseverancia es el camino al éxito

Agradecerle a Dios todo poderoso por siempre acompañarme en cada dificultad y por poner en mi camino a muchas personas que me animaron a seguir adelante, también agradecerle por toda la fortaleza que me dió en los momentos más difíciles de mi vida.

Agradecerle infinitamente a la Santísima Virgen María por cubrirme con su manto y protegerme de todo mal, muchas gracias virgencita por siempre contar contigo como una madre protegiéndome y guiándome.

A la persona más importante de mi vida, mi mamá Julia Miguel de Gómez, agradecerle por ser mi mejor amiga, por cuidarme y guiarme, además de acompañarme en todos mis proyectos, lo logramos mami.

A mi papá Eugenio Gómez y mis hermanos René, María, Fátima, Reyna, Omar, Nelson, Javier y Fernando por toda la ayuda brindada y acompañarme a largo de este camino, al mismo tiempo a mis sobrinos Diego (mi guerrero), Cristopher, Dylan, Wendy, Denis, Fer espero algún día verlos triunfar en la vida.

A mis compañeros de tesis y amigos Mainor y Keyla, fueron un excelente grupo de trabajo, agradecerles porque trabajaron con entrega y dedicación, les deseo lo mejor en su vida familiar y laboral, espero que logren llegar alto y cumplir todos sus propósitos.

Al Prof. Saric López y al Prof. Carlos Reyes, muchas gracias por siempre creer en mí y animarme a lograr mis objetivos.

A todos los profesores de mi querido Centro Escolar Católico “San Bonifacio”, pero en especial a Madre Aura Angélica, Madre Laura Artiga y al Prof. Ever Guandique por toda la ayuda brindada en mis años de estudio.

A Inga. Ceci, Inga. Rico, Inga. Gamero, Ing. Erazo, Ing. Arévalo, Ing. Teodoro, Lic. García y Lic. Rivas por todos sus conocimientos brindados a lo largo de mi paso por la universidad.

Finalmente a todas las personas que conocí durante mi formación en la universidad, pero en especial a Xioma, Astrid, Angie, Ilsa, Iliana, Abi, Byron, Luis, Diego, Abner, Katia, Rebe y Norma, a los cuales los puedo llamar amigos, asimismo a mis amigos Dani (te considero mi mejor amigo), Melissa, Jessica, Nelson, Ariel, Úrsula que ya no estas con nosotros pero sé que desde el cielo estarás muy orgullosa, de todos ustedes aprendí muchas cosas, aprendí el trabajo en equipo, la amistad y la confianza.

Moisés Elías Gómez Miguel

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme permitido llegar hasta acá y culminar una etapa de mi vida académica, porque sin duda alguna El, ha sido mi fortaleza, mi guía, y me ha bendecido poniendo los medios y recursos para el alcance de esta meta porque no dudo que es parte de sus planes.

A mi amado padre Mario Ricardo Reyes y mi amada madre María Antonia Rivera de Reyes por su apoyo incondicional; por creer firmemente que la educación y formación académica era una de las mejores herencias que me pudiera dar. Esto no hubiese sido posible sin su perseverancia e inmensos sacrificios, y ahora puedo decir que lo logramos. A mi hermano Ricardo David Reyes por ser un apoyo siempre y creer en mí, por su tiempo y consejos invaluable.

A mi amado esposo Christian Henrriquez que con mucho amor, comprensión y paciencia me ha apoyado y acompañado en este proceso. A mi hijo Christian Ricardo Henrriquez Reyes, que con su sonrisa me anima siempre.

A mi familia y amigos: Tío Orlando, Tía Tita, Tía Tuly, Gilma, Brenda y Mary, que han confiado en mí, y aun algunos desde la distancia siento su cariño y apoyo.

A todos mis maestros de la Escuela de Ingeniería Química y Alimentos, ya que todos me transmitieron sus conocimientos y aprendí lecciones de vida enriquecedoras e invaluable, que llevaré siempre conmigo.

A mis compañeros de tesis Moi y Mainor por su tiempo y excelente trabajo en este gran equipo; y aquellos que fueron mis compañeros de carrera con quienes tuve el gusto de trabajar, especialmente Esme, Rina, Diana, Xiomara, Cesar y otros más que si los menciono la lista se haría inmensa. A todos ustedes Gracias.

Kayla Reyes

RESUMEN

El presente trabajo de investigación establece la propuesta metodológica para la implementación, desarrollo y calibración de 2 métodos de medición de gas radón, el primero en sitios cerrados e interiores y el segundo en ambientes abiertos aplicando el centelleo líquido como técnica de medición. El objetivo es contribuir con metodologías para medir las concentraciones de gas radón en aire, ya que el radón inhalado afecta de manera negativa a la salud de las personas y también su presencia en el ambiente permite su utilización como trazador radiactivo atmosférico para el comportamiento de fenómenos geológicos, geotérmicos y geoquímicos y ha sido el centro de interés de estudios recientes.

Los métodos propuestos se basan principalmente en las investigaciones realizadas por Canoba y López (2001) y la Guía de la EPA 520/5-87-005, caracterizada la primera por el empleo de un detector compuesto principalmente por un vial de vidrio, carbón activado como agente de adsorción para el gas radón y gel de sílice para el control de la humedad, además utiliza un sistema de muestreo para la detección del radón, que consiste en exponer el vial abierto en el lugar a ser monitoreado, durante un tiempo determinado, para que el radón se adsorba en carbón activado y finalmente, el vial sea medido en un equipo de centelleo líquido de bajo fondo; mientras que la segunda utiliza únicamente un cánister con carbón activado.

Los componentes principales de la propuesta metodológica generada son: (a) un procedimiento experimental detallado para la medición de radón que incorpora un dispositivo de muestreo, vial de vidrio, y la medición de gas radón en el equipo de centelleo líquido (ARN-PI 14/98), (b) una propuesta de diseño para la construcción de la cámara de referencia que proporciona un factor de calibración para el ajuste de las medidas de concentraciones de gas radón a diferentes humedades y temperaturas, (c) una metodología para la determinación del coeficiente de adsorción del gas radón en carbón activado para su selección en función de su capacidad de

adsorción de radón gaseoso, (d) los procedimientos de muestreo de radón en recintos cerrados y estudios ambientales, (e) una propuesta de protocolo para la evaluación del método que permita determinar su fiabilidad para medir gas radón en aire, (f) el diseño del software KEMRADÓN-CIAN, programa en lenguaje Excel, que registra los datos experimentales, realiza el tratamiento estadístico para calcular la concentración del gas radón y la caracterización del carbón activado.

Finalmente se puede concluir que las metodologías propuestas contribuyen para el desarrollo de un plan experimental que permitirá calibrar y evaluar la metodología para la determinación de gas radón en aire aplicando el centelleo líquido como técnica de medición, así como también presentan viabilidad técnica para su implementación como metodologías analíticas fisicoquímicas para determinar la concentración del gas radón.

ÍNDICE

TEMA	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.2 OBJETIVOS	7
1.2.1 Objetivo general.....	7
1.2.2 Objetivos específicos.....	7
1.3 JUSTIFICACIÓN	8
1.4 ANTECEDENTES	9
1.5 HIPÓTESIS	10
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO	11
2.1 RADÓN	11
2.1.1 Isótopos.....	12
2.1.2 Propiedades.....	14
2.1.3 Fuentes.....	15
2.1.3.1 El terreno.....	15
2.1.3.2 El agua.....	16
2.1.3.3 Fuentes de radón en viviendas.....	16
2.1.3.4 Fuentes de radón en edificios.....	17
2.1.4 Emanación, transporte y exhalación de radón.....	18
2.1.4.1 Emanación.....	19
2.1.4.2 Transporte.....	20
2.1.4.3 Exhalación.....	21
2.1.5 Uso de radón como trazador en ciencias medioambientales.....	22
2.1.5.1 Radón como trazador atmosférico.....	23
2.1.5.2 Radón en cuevas.....	24
2.1.5.3 Radón como precursor de terremotos y fallas latentes....	24
2.1.5.4 Radón en campos geotérmicos.....	25
2.1.5.5 Radón en los balnearios radiactivos.....	25
2.1.6 Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes.....	27
2.1.6.1 Factores físicos que influyen en la respuesta celular frente a la radiación.....	27
2.1.6.2 Efectos del radón (Rn^{222}) contenido en el aire, sobre la salud de las personas.....	29

TEMA	Pág.
2.1.6.3 Prevención y mitigación del radón en viviendas o edificios.....	30
2.2 CARBÓN ACTIVADO.....	35
2.2.1 Historia.....	36
2.2.2 Carbón activado.....	37
2.2.3 Composición química.....	37
2.2.4 Formas físicas del carbón activado.....	38
2.2.4.1 Carbón activado en polvo.....	38
2.2.4.2 Carbón activado en forma granular.....	39
2.2.4.3 Carbón activado en pellets.....	39
2.2.5 Caracterización física y química.....	40
2.2.6 Adsorción con carbón activado.....	42
2.2.6.1 Descripción de la adsorción de radón (Rn^{222}) en la superficie del carbón activado.....	44
2.2.7 Difusión del Rn^{222} en el carbón activado.....	46
2.3 MÉTODOS E INSTRUMENTOS PARA MEDICIONES DE RADÓN AEROTRANSPORTADO.....	49
2.3.1 Muestra simple (toma de muestra).....	50
2.3.2 Métodos de monitoreo continuo.....	52
2.3.3 Métodos integrados de medición.....	55
2.4 REGLAMENTACIÓN RADIOLÓGICA CONCERNIENTE AL RADÓN (Rn^{222}) EN AIRE.....	60
2.4.1 Reglamento Especial de Protección y Seguridad Radiológica de El Salvador.....	62
2.4.1.1 Exposición del público debida al radón doméstico.....	63
2.4.1.2 Exposición del público debida al radón en los lugares de trabajo.....	63
2.5 EVALUACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICOS.....	64
2.5.1 Algunos parámetros útiles para la evaluación de una metodología analítica.....	65
2.5.1.1 Linealidad.....	65
2.5.1.2 Límites.....	66
2.5.1.3 Exactitud.....	68
2.5.1.4 Robustez.....	71

TEMA	Pág.
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	72
3.1 TIPO DE ESTUDIO.....	72
3.2 ÁREA DE ESTUDIO.....	72
3.3 MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	73
3.4 METODOLOGÍA.....	75
3.5 BÚSQUEDA Y SÍNTESIS BIBLIOGRÁFICA.....	77
3.6 TÉCNICAS SELECCIONADAS DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA PARA LA MEDICIÓN DE RADÓN (Rn²²²), QUE SERVIRÁN PARA DESARROLLAR Y DISEÑAR LA PROPUESTA METODOLÓGICA.....	79
3.6.1 Técnica de cánister de carbón activado medido con un detector.....	80
3.6.2 Método ARN PI14/98 para determinar radón (Rn ²²²) en carbón activado y medición por centelleo líquido.....	83
3.6.2.1 Determinación del coeficiente de adsorción del gas radón (Rn ²²²) en carbón activado.....	87
3.7 COMPARACIÓN DE DETECTORES DE ADSORCIÓN DE GAS RADÓN QUE UTILIZA LA TÉCNICA DE CÁNISTER DE CARBÓN ACTIVADO Y EL MÉTODO ARN-PI14/98.....	88
3.8 COMPARACIÓN DEL SISTEMA DE MUESTREO EMPLEADO EN LA TÉCNICA DE CÁNISTER DE CARBÓN ACTIVADO Y EL MÉTODO ARN-PI14/98.....	90
CAPÍTULO 4: PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIONES DE GAS RADÓN (Rn²²²), EN RECINTOS CERRADOS Y ESTUDIOS AMBIENTALES.....	92
4.1 OBJETO.....	92
4.2 ÁMBITO DE APLICACIÓN.....	92
4.3 CONSIDERACIONES PREVIAS AL DISEÑO DE LA PROPUESTA.....	94
4.3.1 Caracterización de carbón activado.....	95
4.3.2 Opciones de diseño de detectores de carbón activado.....	98
4.3.2.1 Vial de vidrio.....	98
4.3.3 Consideraciones de equipos y materiales.....	102

TEMA	Pág.
4.3.3.1 Propuesta de diseño de cámara para calibración de metodología.....	102
4.3.3.2 Fuentes emanadoras.....	115
4.4 CALIBRACIÓN DEL MÉTODO Y DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ADSORCIÓN DEL GAS RADÓN EN CARBÓN ACTIVADO.....	130
4.4.1 Protocolo previo a la calibración.....	130
4.4.2 Procedimiento de calibración y determinación del coeficiente de adsorción de gas radón en carbón activado.....	133
4.4.3 Tratamiento de datos etapa de calibración y determinación de coeficiente de adsorción.....	136
4.4.4 Gráficos generados con los datos y cálculos de la calibración..	140
4.4.5 Determinación del factor de calibración (CF).....	143
4.4.6 Determinación de coeficiente de adsorción.....	145
4.4.7 Error 2 sigma (2σ) en el conteo.....	146
4.5 POSIBLES LIMITACIONES DE LA METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN.....	147
4.5.1 Calibración del método y determinación del coeficiente de adsorción del gas radón en carbón activado (Metodología como solución de posibles limitantes).....	148
4.5.1.1 Equipos y materiales.....	150
4.5.1.2 Prueba con carbón activado previamente humidificado en viales (detectores).....	150
4.5.1.3 Prueba con baja humedad en cámara.....	154
4.6 PROCEDIMIENTO DE CONTEO EN EL EQUIPO DE CENTELLEO LÍQUIDO.....	155
4.7 PROCEDIMIENTO DE MUESTREO DE RADÓN EN AIRE EN LUGARES DE TRABAJO O VIVIENDAS.....	158
4.7.1 Consideraciones previas al muestreo.....	158
4.7.2 Muestreo de radón en aire en lugares de trabajo o viviendas....	160
4.8 PROCEDIMIENTO DE MUESTREO DE RADÓN EN AIRE EN ESTUDIOS AMBIENTALES.....	162
4.9 PROTOCOLO DE RETIRADA Y TRANSPORTE DE LOS DISPOSITIVOS.....	164
4.10 PROTOCOLO DE RECEPCIÓN DE LOS VIALES EN EL LABORATORIO.....	165

TEMA	Pág.
4.11 TRATAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DE DESECHOS GENERADOS EN LABORATORIO.....	167
4.12 PRUEBAS SUGERIDAS PARA OPTIMATIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	167
4.12.1 Utilización de cánister de carbón activado como dispositivo.....	168
4.12.1.1. Procedimiento de preparación del dispositivo de muestreo cánister de carbón activado.....	168
4.12.2 Prueba de determinación del dispositivo más óptimo.....	160
4.12.3 Propuesta de prueba: Variación de la altura de torre de lecho empacado (carbón activado) en viales de vidrio.....	169
4.12.3.1 Cálculos y determinación de altura óptima de lecho de carbón activado.....	172
4.12.4 Procedimiento de conteo en el equipo de espectrometría gamma.....	173
CAPÍTULO 5: RESULTADOS, SIMULACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE PROGRAMA KEMRADÓN-CIAN Y PROTOCOLO DE EVALUACIÓN DE METODOLOGÍA.....	179
5.1 PRUEBA PILOTO DE LABORATORIO PARA MEDICIONES DE RADÓN POR MEDIO DE CARBÓN ACTIVADO EN EL CENTRO DE INVESTIGACIONES Y APLICACIONES NUCLEARES (CIAN) DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.....	179
5.1.1 Medición con técnica de centelleo líquido.....	180
5.1.2 Medición con técnica de espectrometría gamma.....	184
5.2 SIMULACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE PROGRAMA KEMRAÓN-CIAN PARA: PRUEBA PILOTO DE LA PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIONES DE GAS RADÓN (Rn²²²) EN RECINTOS CERRADOS Y ESTUDIOS AMBIENTALES.....	189
5.2.1 Caracterización fisicoquímica de carbón activado de origen mineral.....	189
5.2.1.1 Determinación del porcentaje de humedad (%H).....	191
5.2.1.2 Determinación del contenido de cenizas.....	193
5.2.1.3 Determinación de la densidad aparente (Dar).....	195
5.3 SIMULACIÓN DE CALIBRACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	196
5.3.1 Datos registrados en el programa KEMRADÓN-CIAN para la calibración.....	200
5.3.2 Cálculo de la velocidad de exhalación.....	202

TEMA	Pág.
5.3.3 Cálculo de la concentración de radón en la cámara de calibración (CRn).....	205
5.3.4 Cálculo del factor de calibración (CF).....	206
5.3.5 Cálculo del coeficiente de adsorción de radón en carbón activado K(t).....	208
5.3.6 Gráficos generados para los cálculos de calibración.....	209
5.4 MUESTREO EN VIVIENDAS Y EDIFICIOS (ESPACIOS CERRADOS).....	212
5.5 MUESTREOS EN ESTUDIOS AMBIENTALES.....	213
5.6 RESULTADOS PARA LOS DISTINTOS ESTUDIOS DE MUESTREO.....	214
5.7 INFORME FINAL.....	215
5.8 PROTOCOLO DE EVALUACIÓN DE METODOLOGÍA PARA ESTIMACIONES DE CONCENTRACIONES DE GAS RADÓN (Rn²²²), EN RECINTOS CERRADOS Y ESTUDIOS AMBIENTALES APLICANDO CENTELLEO LÍQUIDO.....	219
CONCLUSIONES.....	228
RECOMENDACIONES.....	231
GLOSARIO.....	234
BIBLIOGRAFÍA.....	237
ANEXOS.....	249
ANEXO 1. OBTENCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE LA ESTOPA DE COCO.....	249
ANEXO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO.....	254
ANEXO 3. ESTIMADO DE COTIZACIONES DE EQUIPOS SELECCIONADOS PARA LA CÁMARA DE CALIBRACIÓN.....	264
ANEXO 4. GESTIÓN DE RESIDUOS RADIACTIVOS.....	268
ANEXO 5. CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN DE FORMULARIOS Y MACROS AUTOMATIZADAS EN EL PROGRAMA KEMRADÓN-CIAN.....	272
ANEXO 6. EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL (PPE) UTILIZADO POR EL PERSONAL QUE REALIZA LA PREPARACIÓN Y MANIPULACIÓN DE LAS FUENTES EMANADORAS DE GAS RADON, ASÍ COMO TAMBIÉN EL MUESTREO PERIÓDICO DE GAS RADÓN.....	282
ANEXO 7. MANUAL DE USO DE PROGRAMA KEMRADÓN-CIAN...	284

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	CONTENIDO	Pág.
Tabla 2.1:	Propiedades físicas del Rn ²²²	14
Tabla 2.2:	Principales propiedades fisicoquímicas de los isótopos Rn ²²² , Rn ²²⁰ y Rn ²¹⁶	14
Tabla 2.3:	Concentraciones de uranio en función del tipo de roca.....	15
Tabla 2.4:	Composición química del carbón activado.....	38
Tabla 2.5:	Principales parámetros con los que se caracteriza el carbón activado	40
Tabla 2.6:	Datos técnicos del carbón activado de cáscara de coco 11-00, fabricado a nivel industrial por Carbones Mexicanos con calidad internacional requerida.....	41
Tabla 2.7:	Principales sustancias o gases que se pueden fijar por adsorción en carbón activado	42
Tabla 2.8:	Diferencias entre adsorción química y física.....	46
Tabla 2.9:	Métodos para radón aerotransportados.....	59
Tabla 2.10:	Resumen de reglamentación radiológica sobre el radón (Rn ²²²)	61
Tabla 2.11:	Reglamentación Radiológica sobre el radón en El Salvador..	64
Tabla 3.1:	Síntesis de metodologías, técnicas e instrumentos para la investigación	73
Tabla 3.2:	Resultados obtenidos en la medición de radón en la ciudad de Peñiscola, mediante el cánister de carbón activo.....	83
Tabla 3.3:	Comparación de detectores de adsorción de gas radón en carbón activado.....	89
Tabla 3.4:	Tabla comparativa de las características de las metodologías escogidas.....	90
Tabla 4.1:	Normas ASTM con las que se evalúan los principales parámetros para caracterizar un carbón activado dentro de la metodología propuesta.....	96
Tabla 4.2:	Principales parámetros con los que se especifica un carbón activado granular de origen mineral	97
Tabla 4.3:	Datos técnicos del carbón activado de cáscara de coco 11-00 fabricado a nivel industrial por Carbones Mexicanos con calidad internacional requerida.....	97

TABLA	CONTENIDO	Pág.
Tabla 4.4:	Composición química típica del vidrio de borosilicato (%peso).....	99
Tabla 4.5:	Energías de emisión de algunos radioelementos.....	99
Tabla 4.6:	Opciones para materiales o armadura de la cámara.....	103
Tabla 4.7:	Dispositivos encontrados en la web para el diseño de cámara.....	108
Tabla 4.8:	Dispositivos, equipos o materiales considerados para formar el sistema de calibración	111
Tabla 4.9:	Materiales de referencia disponibles.....	116
Tabla 4.10:	Opciones de preparación de la fuente emanadora.....	116
Tabla 4.11:	Datos para determinación de densidad aparente de tierra seca.....	125
Tabla 4.12:	Datos para determinar la concentración de radio inicial en la tierra.....	126
Tabla 4.13:	Procedimientos a realizar para utilizar gasa como fuente emanadora.....	128
Tabla 4.14:	Caracterización de roca de uranio (U^{238}) como fuente emanadora.....	129
Tabla 4.15:	Forma de extracción de viales y etiquetado.....	134
Tabla 4.16:	Registro de datos para la calibración de la metodología.....	138
Tabla 4.17:	Registro de datos para valores promediados de cada extracción diaria de dispositivos de muestreo.....	139
Tabla 4.18:	Datos obtenidos de tiempo de exposición (t) y exhalación (E) en cámara de calibración	141
Tabla 4.19:	Etiquetas para pre-humidificación de viales durante dos horas.....	151
Tabla 4.20:	Etiquetas para pre-humidificación de viales durante cuatro horas.....	151
Tabla 4.21:	Etiquetas para pre-humidificación de viales durante seis horas.....	151
Tabla 4.22:	Forma de extracción de viales en prueba con radón en metodología como propuesta a limitaciones.....	153
Tabla 4.23:	Cantidad de detectores recomendados para los estudios de exposición al radón en edificios multiniveles y viviendas de un solo piso.....	158

TABLA	CONTENIDO	Pág.
Tabla 4.24:	Descarte o tratamiento de desechos radioactivos generados en el laboratorio.....	167
Tabla 4.25:	Energías gamma del plomo (Pb^{214}) y bismuto (Bi^{214}).....	178
Tabla 5.1:	Registro de pruebas realizadas con equipo de centelleo líquido.....	182
Tabla 5.2:	Cuentas por segundo de diez blancos de carbón activado....	223
Tabla 5.3:	Distribución del tipo de carbón activado utilizando en la prueba de robustez del método.....	225
Tabla 5.4:	Tabla resumen de las Cuentas por segundo y desviación estándar de cada dispositivo analizado.....	226
Tabla 5.5:	Pruebas de control de la metodología para estimación de concentraciones de gas radón en carbón activado.....	227
Tabla A.1:	Tiempo necesario conseguir un factor de decrecimiento que indique que el residuo es de baja actividad.....	270

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	CONTENIDO	Pág.
Figura 2.1:	Serie radiactiva natural del uranio (U^{238}).....	13
Figura 2.2:	Típicas fuentes de radón y sus rutas de entrada en una vivienda.....	17
Figura 2.3:	Típicas fuentes de radón y sus rutas de entrada en un edificio.....	18
Figura 2.4:	Proceso de liberación de radón a la atmósfera.....	19
Figura 2.5:	Condiciones meteorológicas que influyen en las mediciones de exhalación de gas radón.....	22
Figura 2.6:	Influencia de la dosis y tasa de dosis en la respuesta celular (supervivencia) frente a la radiación.....	28
Figura 2.7:	Esquema de las consecuencias de la interacción de la radiación ionizante con los componentes celulares.....	29
Figura 2.8:	Ruta que siguen las partículas de la progenie del radón antes y después de ingresar a los pulmones.....	30
Figura 2.9:	Criterios de diseño para los sistemas de prevención y mitigación de radón.....	33
Figura 2.10:	Principales estrategias de prevención y mitigación de radón.....	34
Figura 2.11:	Historia del carbón activado.....	36
Figura 2.12:	Estructura interna del carbón activado.....	37
Figura 2.13:	Carbón activado en polvo.....	38
Figura 2.14:	Carbón activado granular.....	39
Figura 2.15:	Carbón activado en pellets.....	39
Figura 2.16:	Proceso de adsorción y desorción de moléculas en carbón activado.....	43
Figura 2.17:	Esquema que ilustra el adsorbente, el adsorbato y el adsorbivo.....	44
Figura 2.18:	Etapas del proceso de adsorción.....	45
Figura 2.19:	Esquema del monitor, vial de centelleo conteniendo el carbón activado.....	47
Figura 2.20:	Esquema de métodos de medición de radón.....	49
Figura 2.21:	Celda de centelleo Pylon 600A/610A.....	51
Figura 2.22:	Cámara de ionización Alpha Guard.....	51
Figura 2.23:	Monitor de celda de centelleo de flujo continuo PYLON AB7.....	53

FIGURA	CONTENIDO	Pág.
Figura 2.24:	Cámara de iones con software en un microcontrolador PIC.....	54
Figura 2.25:	Monitor electrostático de difusión pasiva Corentium Home Radon Detector.....	54
Figura 2.26:	Monitor de radón- RADON SCOUT PLUS.....	55
Figura 2.27:	Detector de pistas Alpha Track.....	57
Figura 2.28:	Cánister de carbón activado.....	58
Figura 2.29:	Electets E-perm S.....	58
Figura 2.30:	Rango lineal en la curva y establecimiento de la curva de calibración.....	66
Figura 3.1:	Diagrama de flujo de la metodología a seguir.....	76
Figura 3.2:	Esquema del proceso de búsqueda y depuración bibliográfica.....	77
Figura 3.3:	Esquema del proceso de selección e inclusión bibliográfica.....	78
Figura 3.4:	Clasificación y cantidad de estudios seleccionados.....	78
Figura 3.5:	Cánister de carbón activado.....	80
Figura 3.6:	Recipiente impermeable al radón.....	80
Figura 3.7:	Sistema cánister-recipiente impermeable.....	81
Figura 3.8:	Esquema del detector de centelleo.....	82
Figura 3.9:	Espectro gamma del Pb^{214} y el Bi^{214}	82
Figura 3.10:	Configuración de capas del dispositivo de muestreo de radón.....	83
Figura 3.11:	Cámara de referencia para la calibración de detectores de radón en aire.....	84
Figura 3.12:	Proceso de absorción de fotones en un medio líquido orgánico y detección en un equipo de centelleo.....	85
Figura 3.13:	Partes internas de un equipo de centelleo líquido.....	86
Figura 3.14:	Histograma de la concentración de radón en viviendas....	87
Figura 3.15:	Coeficiente de adsorción en función del tiempo para diferentes valores de humedad relativa.....	88
Figura 4.1:	Propuesta de metodología para estimación de concentraciones de gas radón (Rn^{222}), en recintos cerrados y estudios ambientales.....	94
Figura 4.2:	Vial de vidrio.....	100
Figura 4.3:	Preparación de vial de vidrio para la propuesta de la metodología según Canoba y López (2001).....	101

FIGURA	CONTENIDO	Pág.
Figura 4.4:	Ejemplo de sistema de empaques y puerta frontal de la cámara.....	104
Figura 4.5:	Ejemplo de repisas removibles dentro de cámara.....	105
Figura 4.6:	Esquema de entradas a cámara.....	106
Figura 4.7:	Ejemplo bandeja inferior/fuente emanadora de tierra.....	107
Figura 4.8:	Dispositivos, equipos o materiales considerados para formar el sistema de calibración.....	112
Figura 4.9:	Vista lateral derecha del diseño de la cámara de calibración con dispositivos propuestos.....	113
Figura 4.10:	Vista frontal del diseño de la cámara de calibración con dispositivos propuestos.....	114
Figura 4.11:	Preparación de fuente emanadora.....	118
Figura 4.12:	Recolección de tierra a utilizar para la preparación como fuente emanadora de radón.....	119
Figura 4.13:	Procesamiento de la tierra recolectada.....	120
Figura 4.14:	Determinación de la densidad aparente de la tierra a utilizar.....	121
Figura 4.15:	Preparación de la tierra como fuente emanadora.....	122
Figura 4.16:	Determinación de concentración de Rn^{222} y Ra^{226} de fondo de la tierra.....	123
Figura 4.17:	Método del cuarteo utilizado en el procedimiento de determinación de concentración de Rn^{222} y Ra^{226} de fondo.....	124
Figura 4.18:	Preparación de la fuente emanadora con solución de referencia en gasa impregnada.....	127
Figura 4.19:	Pasos a seguir previos a la calibración.....	131
Figura 4.20:	Determinación de coeficiente de adsorción de gas radón en carbón activado.....	133
Figura 4.21:	Metodología de calibración y determinación de coeficiente de adsorción.....	135
Figura 4.22:	Cuentas netas (N) vrs tiempo de exposición (t).....	140
Figura 4.23:	Representación gráfica del aumento de la concentración en el aire al interior de la cámara (C_{Rn}) vrs tiempo de exposición (t).....	142
Figura 4.24:	Ganancia de agua versus factor de calibración para dos días de exposición.....	144

FIGURA	CONTENIDO	Pág.
Figura 4.25:	Curvas de calibración para cánister reciclados usando modelos no lineales.....	145
Figura 4.26:	Diagrama de metodología de calibración como solución a posibles limitantes.....	149
Figura 4.27:	Diagrama de sistema de humidificación.....	152
Figura 4.28:	Preparación coctel de centelleo líquido.....	155
Figura 4.29:	Posibles fracturas que podría presentar el vial posterior al muestreo.....	156
Figura 4.30:	Espectro de los productos de decaimiento del radio (Ra^{226}) obtenidos mediante la técnica de centelleo líquido	157
Figura 4.31:	Distribución recomendada del detector en el punto de muestreo.....	160
Figura 4.32:	Ejemplo de etiqueta para muestreo de radón en viviendas o lugares de trabajo.....	161
Figura 4.33:	Recipiente en forma de domo impermeable al radón.....	164
Figura 4.34:	Ejemplo de caja para transporte de muestras hacia laboratorio.....	165
Figura 4.35:	Flujograma de muestreo en espacios cerrados o exterior o en suelos.....	166
Figura 4.36:	Configuración de cánister de carbón activado recomendado por la EPA.....	168
Figura 4.37:	Dispositivo configuración A.....	170
Figura 4.38:	Dispositivo configuración B.....	170
Figura 4.39:	Distribución de radón (Rn^{222}) en un lecho de carbón activado para diversos tiempos de exposición.....	172
Figura 4.40:	Diámetro del detector de NaI.....	173
Figura 4.41:	Detectores de NaI con los que cuenta el laboratorio del CIAN-FIA-UES.....	174
Figura 4.42:	Blindaje de plomo que recubre el sistema.....	174
Figura 4.43:	Esquema general del detector de centelleo de yoduro sódico.....	174
Figura 4.44:	Detector de centelleo de yoduro sódico.....	175
Figura 4.45:	Colocación de muestra de carbón activado sobre detector de NaI.....	176
Figura 4.46:	Espectro obtenido con el detector de centelleo de yoduro sódico para una muestra de carbón activado con radón...	177

FIGURA	CONTENIDO	Pág.
Figura 5.1:	Cámara que contiene viales con carbón activado y rocas uraníficas (izquierda). Exposición de 2 g de carbón activado a rocas que liberan gas radón al interior de la cámara (derecha).....	180
Figura 5.2:	Vial con carbón activado (derecha). Vial con carbón activado y coctel de centelleo a base de tolueno (izquierda).....	180
Figura 5.3:	Equipo de centelleo líquido CIAN-FIA-UES (derecha) Porta cassette y viales a medir dentro del equipo (izquierda).....	181
Figura 5.4:	Espectro de vial blanco en equipo de centelleo líquido.....	182
Figura 5.5:	Espectro que muestra la actividad registrada de conteos por minuto (CPM) provenientes de radón y descendientes absorbidos en carbón activado.....	183
Figura 5.6:	Módulos que componen espectrometría gamma de CIAN-FIA. Módulo A.....	184
Figura 5.7:	Espectro de fondo del equipo de espectrometría gamma..	185
Figura 5.8:	Espectro de fondo de vial con carbón activado.....	185
Figura 5.9:	Espectro de medición de carbón activado en cámara con exposición de 3 días.....	186
Figura 5.10:	Material de referencia de suelo con Ra ²²⁶ (izquierda) y tabla de resultados de intercomparación de materiales encontrados en la muestra y registro de actividad por parte del IAEA (derecha).....	187
Figura 5.11:	Espectro registrado de material de referencia de suelo con contenido de Ra ²²⁶	188
Figura 5.12:	Pantalla inicial del programa KEMRADÓN-CIAN.....	190
Figura 5.13:	Pantalla donde se selecciona el parámetro fisicoquímico a calcular para el lote de carbón activo utilizado.....	191
Figura 5.14:	Pantalla de ingreso de datos del carbón activo para el cálculo del porcentaje de humedad (%H).....	192
Figura 5.15:	Pantalla donde se muestra la información guardada y generada para la determinación del porcentaje de humedad (%H).....	193
Figura 5.16:	Selección del botón Determinación del contenido de cenizas.....	193

FIGURA	CONTENIDO	Pág.
Figura 5.17:	Pantalla de ingreso de datos del carbón activo para el cálculo del porcentaje de cenizas totales.....	194
Figura 5.18:	Pantalla donde se muestra la información guardada y generada para la determinación del porcentaje de cenizas totales.....	195
Figura 5.19:	Pantalla de ingreso de datos del carbón activo para el cálculo de la densidad aparente recibida.....	195
Figura 5.20:	Pantalla donde se muestra la información guardada y generada para la determinación de la densidad aparente.	196
Figura 5.21:	Pantalla que muestra la función TENDENCIA de Microsoft Excel para la generación de los datos adicionales de la prueba piloto.....	197
Figura 5.22:	Continuación de la pantalla que muestra la función TENDENCIA de Microsoft Excel para la generación de los datos adicionales de la prueba piloto.....	198
Figura 5.23:	Pantalla de ingreso de datos de cada uno de los dispositivos para la calibración- llenado de primer dispositivo.....	199
Figura 5.24:	Pantalla de ingreso de datos de cada uno de los dispositivos para la calibración- llenado de ultimo dispositivo.....	200
Figura 5.25:	Pantalla de registro para los datos de calibración de la metodología.....	201
Figura 5.26:	Pantalla de datos exportados de la calibración de la metodología.....	202
Figura 5.27:	Pantalla de promedios de datos por extracción de dispositivos de muestreo.....	203
Figura 5.28:	Pantalla de parámetros necesarios para realizar los cálculos de velocidad de exhalación, concentración de radón, factor de calibración y coeficiente de adsorción de radón en carbón activado.....	204
Figura 5.29:	Pantalla donde se muestran los resultados para la velocidad de exhalación superficial para la calibración de la metodología.....	205
Figura 5.30:	Pantalla donde se muestran los resultados para la concentración de radón (Rn ²²²) dentro de la cámara de calibración.....	206

FIGURA	CONTENIDO	Pág.
Figura 5.31:	Pantalla donde se muestran los resultados para el factor de calibración (CF).....	207
Figura 5.32:	Pantalla donde se muestran los resultados para calcular el coeficiente de adsorción K(t) para el lote de carbón activo, utilizado en la calibración.....	208
Figura 5.33:	Estadística descriptiva del set de datos obtenidos del coeficiente de adsorción de gas radón en carbón activado	209
Figura 5.34:	Tabla de factor de calibración y diferencia de peso de los dispositivos de muestreo (izquierda) y gráfico del factor de calibración (CF) versus el cambio de peso promedio (ΔP) para la tendencia de datos de la prueba piloto (derecha).....	210
Figura 5.35:	Tabla de coeficiente de adsorción y tiempo de exposición (izquierda) y gráfico del coeficiente de adsorción K(t) versus tiempo de exposición promedio de los dispositivos (ts) generados para la tendencia de datos de la prueba piloto.....	211
Figura 5.36:	Pantalla de captura de datos para muestreo en espacios cerrados.....	212
Figura 5.37:	Pantalla de captura de datos para muestreo en estudios ambientales.....	213
Figura 5.38:	Pantalla de resultados del cálculo de la concentración de radón (Rn^{222}) para cada uno de los estudios en espacios cerrados y ambientales.....	214
Figura 5.39:	Formulario de ingreso de los datos generales del dispositivo de muestreo.....	215
Figura 5.40:	Formulario de ingreso de los resultados de la medición....	216
Figura 5.41:	Formulario de ingreso de los datos del muestreo.....	216
Figura 5.42:	Informe final del dispositivo muestreado.....	217
Figura 5.43:	Esquema general del funcionamiento del programa KEMRADÓN-CIAN.....	218
Figura 5.44:	Tabla de conteos del dispositivo y concentración de radón (izquierda) y gráfico de conteos versus la concentración de radón generados en la pantalla del programa KEMRADÓN-CIAN (derecha).....	221
Figura 5.45:	Valores del promedio y desviación estándar de los 10 blancos de carbón activado.....	223

FIGURA	CONTENIDO	Pág.
Figura 5.46:	Valores de LOD y LOQ de los 10 blancos de carbón activado.....	224
Figura A.1:	Procedimiento para recolectar, secar y reducir el tamaño de la concha de coco.....	249
Figura A.2:	Procedimiento para activar el carbón mediante el método químico utilizando ácido fosfórico al 85%.....	250
Figura A.3:	Procedimiento para llevar a cabo el lavado del carbón activado.....	251
Figura A.4:	Procedimiento para llevar a cabo el secado, reducción de tamaño y pesado del carbón activado.....	253
Figura A.5:	Procedimiento para determinar el contenido de humedad en el carbón activado.....	254
Figura A.6:	Procedimiento para determinar el contenido de cenizas en el carbón activado.....	256
Figura A.7:	Procedimiento para determinar la densidad aparente en el carbón activado.....	258
Figura A.8:	Procedimiento para determinación de análisis granulométrico en el carbón activado.....	260
Figura A.9:	Procedimiento para determinación de pH en carbón activado.....	263
Figura A.10:	Cotización estimada de equipo control de humedad Inkbird IHC200.....	264
Figura A.11:	Cotización estimada de equipo para monitoreo de radón Airthings 223 Corentium Home Radon Detector.....	265
Figura A.12:	Equipo termostato con manta calefactora Ipower Under Tank Heat Pad.....	266
Figura A.13:	Equipo nebulizador Rossmax utilizado en cámara de calibración como humidificador.....	267
Figura A.14:	Código de formulario en VBA para determinar el porcentaje de humedad de una muestra de carbón activado.....	272
Figura A.15:	Código de formulario en VBA para determinar el contenido de cenizas en carbón activado.....	272
Figura A.16:	Programación en VBA para calcular la densidad aparente de carbón activado.....	273

FIGURA	CONTENIDO	Pág.
Figura A.17:	Formulario de ingreso de datos y código VBA para determinar la densidad y concentración de radón en tierra.....	273
Figura A.18:	Programación en VBA de la hoja de datos de la calibración de la metodología.....	274
Figura A.19:	Programación en VBA de la hoja de datos para muestreo de radón en viviendas o edificios.....	277
Figura A.20:	Programación en VBA de la hoja de datos para muestreo de radón en estudios ambientales.....	279
Figura A.21:	Programación en VBA para calcular la concentración de radón adsorbida en carbón activado durante muestreo.....	281
Figura A.22:	Máscara con filtro de partículas.....	282
Figura A.23:	Bata blanca de laboratorio.....	282
Figura A.24:	Gafas protectoras.....	283
Figura A.25:	Guantes de látex desechables.....	283

SIGLAS

AEFI:	Asociación Española de Farmacéuticos de la Industria.
ADN:	Ácido Desoxirribonucleico.
ARN:	Autoridad Regulatoria Nuclear
ATD:	Detector Alfa-Track
CIEMAT:	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas.
CIAN-FIA-UES:	Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador.
CIC-UES:	Consejo de Investigaciones Científicas de la Universidad de El Salvador.
CIIC:	Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer.
CSN:	Consejo de Seguridad Nuclear.
DPA:	Detectores de Pista Alfa.
DPR:	Dirección de Protección Radiológica del Ministerio de Salud.
EER:	Concentración Equivalente de Radón.
EPA:	United States Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos).
IAEA:	International Atomic Energy Agency (Organismo Internacional de Energía Atómica).

ICRP:	International Commission on Radiological Protection (Comisión Internacional de Protección Radiológica).
INSHT:	Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
ISG:	Instituto para la Salud Geoambiental.
ISP:	Instituto de Salud Pública de Chile.
ISTAS:	Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud.
LET:	Transferencia Lineal de Energía.
LMP:	Límites máximos permisibles.
LOD:	Límite de detección.
LOQ:	Límite de cuantificación.
MARN-Guatemala	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de la República de Guatemala.
ONU:	Organización de las Naciones Unidas.
OMS:	Organización Mundial de la Salud.
ONUAA:	Organización de las Naciones Unidas de la Alimentación y la Agricultura.
OSA:	Organismo Salvadoreño de Acreditación.
SNET:	Servicio Nacional de Estudios Territoriales.
UNSCEAR:	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de las Radiaciones Atómicas).
WHO:	World Health Organization.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene como tema la “Propuesta De Metodología Para Estimación De Concentraciones De Gas Radón (Rn^{222}), En Recintos Cerrados Y Estudios Ambientales Aplicando Centelleo Líquido”. Con la propuesta metodológica se logró elaborar, definir y sistematizar el conjunto de técnicas, métodos y procedimientos que se deben seguir, con el fin de obtener: estimaciones de concentraciones de gas radón a las cuales están expuestas las personas que laboran en lugares con poca ventilación y concentraciones de gas radón en sitios de interés ambiental (cuevas turísticas y campos geotérmicos).

El gas radón (Rn^{222}) es un gas noble de origen natural, proveniente de la cadena de desintegración radiactiva del uranio (U^{238}), está presente en la mayoría de los materiales que existen en el planeta, los átomos de radón principalmente son liberados a partir de una matriz sólida de minerales naturales y migran en un corto tiempo al aire, por medio del fenómeno de exhalación. Su vida media de 3.825 días permite su acumulación en el ambiente, produciendo un decaimiento en isótopos de otros elementos, las llamadas hijas del radón de período corto, las cuales se unen a partículas ultrafinas y partículas de polvo presentes en el aire (Canoba y López 2006). Siendo con su vida media el isótopo más importante del radón, al poseer la vida media más larga, lo que permite una exposición más prolongada por parte de los humanos a la inhalación de radón (Rn^{222}).

Por lo anterior el gas radón (Rn^{222}) es la fuente de radiación de origen natural que más contribuye a la dosis efectiva recibida por el ser humano. Se ha estimado que el radón y los radionucleidos resultantes de su desintegración, contribuyen con las tres cuartas partes de la dosis recibida por el hombre de fuentes terrestres naturales, y aproximadamente con la mitad de la dosis efectiva recibida de la totalidad de las

fuentes (UNSCEAR, 2000). Además, según la ONU (2000), en los espacios cerrados, el gas radón se acumula y puede alcanzar concentraciones importantes. Esto ocurre tanto en viviendas como en ambientes de trabajo, resultando en una significativa fuente de exposición de las personas. La OMS (2015) expone que: el radón en las viviendas aumenta el riesgo de cáncer de pulmón en la población. En nuestro país el Reglamento Especial de Protección y Seguridad Radiológica de El Salvador en su actualización del 2018, establece el nivel máximo de concentración de actividad de gas radón doméstico en viviendas y en lugares de trabajo de 300 Bq/m³ y de 1000 Bq/m³ respectivamente, como parámetro de seguridad radiológica.

Se ha demostrado que el radón tiene el potencial para ser utilizado como trazador en el estudio de reservorios geotérmicos. La combinación de sus propiedades físicas y nucleares, su emanación y transporte en fluidos hace que algunas medidas de concentración de este sean útiles en estudios de fractura, permeabilidad y características de flujo en diferentes tipos de fuentes geotérmicas (Kruger & Warren, 1978). En geología existe un interés creciente en estudios concernientes a la actividad de radón en suelos debido a su potencial como trazador de diversos fenómenos: comprensión de actividad tectónica, erupciones volcánicas y liberación de gases a través de fallas (Cirrincione et al., 2016).

En respuesta a la necesidad de investigación en esta área, debido a su importancia y diversidad de aplicaciones (en salud y como industria geotérmica; sectores de gran relevancia en el país), y a iniciativa del CIAN-FIA-UES se planteó desarrollar una propuesta de metodología que permita estimar concentraciones de gas radón en aire, la cual puede ser aplicada en estudios ambientales y en recintos cerrados, con base en el principio de adsorción de gases en muestreadores pasivos de carbón activado y la técnica de centelleo líquido.

Para el desarrollo de la metodología se recolectó información de las metodologías existentes para la estimación de concentraciones de gas radón en aire utilizando detectores de adsorción de carbón activado, se recopiló información de la metodología para determinar el coeficiente de adsorción de gas radón en carbón activado, posteriormente se depuraron y seleccionaron las metodologías que ayudaron a plantear cada una de las etapas de la metodología.

Con los resultados de las etapas del trabajo de investigación se sientan las bases teóricas de la propuesta de metodología para realizar estimaciones de concentraciones de gas radón en viviendas y estudios ambientales, para poder llevar a cabo estudios prácticos en lugares donde por las condiciones se sospeche que la concentración de radón supera los límites permisibles por el Reglamento Especial de Protección y Seguridad Radiológica de El Salvador. Además de proporcionar una herramienta para el registro de datos de calibración y muestreo, así mismo para el cálculo de parámetros de interés correspondientes (coeficiente de adsorción, coeficiente de exhalación, concentración de radón (Rn^{222})), por medio del programa KEMRADÓN-CIAN que sintetiza la información generada por la puesta en marcha de la metodología.

La metodología propuesta considera las etapas de: consideraciones previas al diseño de la propuesta de metodología, calibración del método, determinación del coeficiente de adsorción del gas radón en carbón activado, procedimiento de conteo en el equipo de centelleo líquido, procedimiento de muestreo de radón en aire en lugares de trabajo o viviendas, procedimiento de muestreo de radón en aire en estudios ambientales, protocolo de retirada, transporte y recepción de los dispositivos de muestreo, tratamiento de desechos generados, pruebas sugeridas para optimizar la metodología además de la simulación del programa KEMRADÓN-CIAN para el tratamientos matemático y estadístico de los datos generados en la metodología.

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

A lo largo de este capítulo se presentan la importancia y los enfoques principales del trabajo de investigación, de la misma forma se establecen los objetivos a cumplir y las hipótesis a comprobar durante el desarrollo de la investigación, igualmente se mencionan los estudios concernientes al gas radón llevados a cabo en El Salvador, que sirven como fundamento para la indagación inicial de la temática.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El gas radón es la fuente más importante de radiación natural, el isótopo más abundante del radón (Rn^{222}) es un gas noble formado a partir del radio (Ra^{226}), que a su vez es un producto de desintegración de uranio (U^{238}) (presentes de forma natural en suelos y rocas). El gas radón con una vida media de 3.8 días tiende a concentrarse en espacios cerrados. Las fuentes de radón en las casas son principalmente: el suelo en las que se asientan, las paredes, piso, y techo; el radón puede penetrar por todas las grietas, por mínimas que sean, desde pequeñas fisuras hasta orificios como los poros de bloques de cemento (OMS, 2015). Además de las fuentes anteriores el radón puede presentarse en terrenos donde no existen construcciones dependiendo mayoritariamente del tipo de suelo.

El radón es un riesgo a la salud pública, ya que cuando se inhala, las partículas alfa densamente ionizantes pueden interactuar con los tejidos biológicos pulmonares dando como resultado daños en el Ácido Desoxirribonucleico (ADN), provocando paulatinamente la aparición de cáncer de pulmón.

El gas radón es la segunda causa de cáncer de pulmón después del tabaco, esta relación es efectiva incluso en niveles de radón relativamente bajos que existen algunas veces en los edificios residenciales, además el radón fue clasificado como carcinógeno humano por la EPA en 1987 y el CIIC en 1998, el porcentaje de los

casos de cáncer de pulmón atribuible al radón en interiores es del 5% en Alemania, 7.8% en Canadá, 10-14% en Estados Unidos, 5% en Francia, 3.3% en Reino Unido y 8.3% en Suiza, con un número de estimación de muertes anuales por cáncer de pulmón inducido por radón de 1896 en Alemania, 1400 en Canadá, 15400-21800 en Estados Unidos, 1234 en Francia, 1089 en Reino Unido y 231 en Suiza (OMS, 2015); por otra parte el radón es importante en campos geotérmicos ya que es una condición necesaria para determinar las fallas geológicas locales activas, puesto que asociadas a estas se localizan las fuentes de calor. Debido a la gran actividad termodinámica del campo existe una gran cantidad de gases generados en el subsuelo que transporta al gas radón hacia la superficie. Este transporte se ve favorecido a través de las fallas activas, por lo que la determinación de la distribución superficial de radón en un campo es una radiografía aproximada a dichas fallas (Balcázar, Flores, López y Peña, s.f).

Para el caso de El Salvador su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico y la subducción de la Placa de Cocos sobre la Placa del Caribe dieron origen a una extensa cadena volcánica, que producto de cambios físicos y químicos propios del fenómeno fueron formando los suelos del país (SNET, 2020), a causa de lo anterior estudios recientes muestran concentraciones de gas radón en algunos suelos, como por ejemplo los cercanos a la Caldera de Ilopango (Hernández, López, Monterrosa, Pérez & Ransom, 2004); de forma similar la alta sismicidad del país puede provocar fisuras en suelos, en donde el radón puede migrar rápidamente al aire.

El radón es un contaminante ambiental que debe ser medido y monitoreado constantemente en recintos cerrados con poca ventilación donde laboran o habitan personas durante tiempos prolongados, además en algunos países como Estados Unidos la EPA recomienda que para comprar o vender una vivienda, se realice una prueba de detección de radón, ya que se estima que casi una de cada quince viviendas tienen un nivel de gas radón elevado.

En el país el CIAN-FIA-UES es pionero en investigaciones de mediciones de gas radón, realizando estudios en: las aguas termales del Cerro Pacho, Lago de Coatepeque en el departamento de Santa Ana (Rodríguez, Olmos y Payes, 2014) y en matrices de agua subterráneas destinadas al consumo humano, en el área metropolitana de San Salvador (Morales, Rodríguez y Sigüenza, 2019); además de lo anterior la línea de investigación del CIAN-FIA-UES en el tema de radionúclidos naturales, especialmente en el gas radón, existe la necesidad de ampliar su alcance hacia el análisis de radón en aire, a través de técnicas y métodos donde se utilicen recursos disponibles en este centro de investigación, además de establecer procedimientos y protocolos para el muestreo de gas radón en recintos cerrados y estudios ambientales, diseño y adaptación de equipos para calibración del método y medición de radón mediante la técnica de centelleo líquido, proporcionando de esta manera una metodología robusta para ejecutar a futuro monitoreos de radón en El Salvador, y así obtener como resultado de estos estudios valores de concentraciones medias de radón en interiores que serán comparados con los niveles de referencia establecidos en los artículos 150 y 153 del Reglamento Especial de Protección y Seguridad Radiológica de El Salvador; por lo que mediante cooperación con la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos se plantea, como tema de trabajo de graduación una propuesta de metodología para estimación de concentraciones de gas radón (Rn^{222}), en recintos cerrados y estudios ambientales.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Proponer la evaluación de metodología para la estimación de concentraciones de gas radón (Rn^{222}), fundamentada en el uso de detectores de carbón activado aplicable a espacios cerrados y estudios ambientales utilizando el centelleo líquido como técnica de medición.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Proponer la metodología para la estimación de las concentraciones de gas radón en aire utilizando detectores de adsorción de carbón activado, adaptando su aplicación en recintos cerrados y en estudios de suelo.
- b) Sistematizar el procedimiento metodológico para la determinación cuantitativa del coeficiente de adsorción del gas radón en carbón activado, para aplicarlo como criterio de selección y manejo en procesos de adsorción del gas radón en aire y su posterior medición.
- c) Proponer el diseño del sistema de muestreo del gas radón en aire, basado en el uso de detectores de carbón activado para su aplicación en espacios cerrados y estudios ambientales.
- d) Diseñar el protocolo de evaluación del método analítico propuesto, a través de parámetros estadísticos que genere la fiabilidad del método en este tipo de aplicaciones.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El gas radón es un peligro para la salud de las personas, las partículas radioactivas recibidas por inhalación se depositan en el tejido pulmonar y emiten radiación alfa sobre las células broncopulmonares, provocando mutaciones de ADN facilitando la aparición de cáncer de pulmón (OMS, 2015), por lo cual es importante monitorearlo y medirlo en espacios con poca ventilación; además el transporte de radón a la superficie por otros geo fluidos proporciona una huella de procesos geofísicos, geotérmicos, hidrológicos, sísmicos y volcánicos; se ha encontrado que la difusión del radón es útil como trazador natural para determinar la distribución de contaminantes por derrames de hidrocarburos en el subsuelo y para determinar fallas activas asociadas a fuentes de calor (Balcázar et al., s.f).

Lo que conlleva a proponer una metodología que permita estimar la concentración de radón (Rn^{222}), en el aire confinado en los recintos cerrados y exhalado de forma natural en espacios sin edificaciones.

El trabajo de investigación propone la evaluación de la metodología planteada, para la estimación de concentraciones de gas radón (Rn^{222}) fundamentada en el uso de detectores de carbón activado; para lograr plantear la metodología se ha diseñado el detector de adsorción, se ha conformado la sistematización del procedimiento para determinar el coeficiente de adsorción del gas radón en carbón activado, el sistema de muestreo, el protocolo de evaluación de la metodología, asimismo se ha realizado un estudio piloto que permite evaluar mediante parámetros estadísticos la metodología propuesta.

Finalmente, la investigación permite contar con una metodología para identificar y estimar la concentración de radón en aire en recintos cerrados y en superficies abiertas. De la misma forma servirá como antecedente para estudios posteriores.

1.4 ANTECEDENTES

En El Salvador, el reglamento Especial de Protección y Seguridad Radiológica en su actualización del 2018, establece el nivel máximo de concentración de actividad de gas radón doméstico en viviendas y en lugares de trabajo, como parámetro de seguridad radiológica.

Por otra lado el Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador (CIAN-FIA-UES), ha realizado diferentes investigaciones relacionadas al radón, entre las que se pueden mencionar: la llevada a cabo por Rodríguez Carpio (2013) en donde se cuantificó la actividad de radón (Rn^{222}) en las aguas termales del Cerro Pacho, Lago de Coatepeque, departamento de Santa Ana; también la realizada por Morales et al. (2019) en matrices de agua subterránea destinadas al consumo humano, en el área metropolitana de San Salvador. De la misma forma Barahona et al. (2004), estudiaron las anomalías de radón en el Cerro Pacho y en el cráter del volcán de Santa Ana, así mismo Morales y Sigüenza (2018) determinaron la actividad del radón (Rn^{222}) en fuentes termales de áreas geotérmicas (Berlín, San Vicente y Ahuachapán), además Payes (2017) presentó un estudio relacionado a la radiactividad natural en aguas de consumo humano y ambiental, finalmente Hernández et al. (2004) estudiaron la dinámica de la desgasificación difusa en la Caldera de Ilopango, presentando las primeras evaluaciones de concentraciones de gas radón en superficie. Para el caso de mediciones de gas radón en aire, Payes (2004) realizó la identificación y cualificación de gas radón en el almacén de fuentes radiactivas en desuso en el Hospital Nacional San Juan de Dios, Santa Ana, como resultado del Proyecto 02-19 del CIC UES, año 2004; en conjunto estas investigaciones crean un marco inicial, para la generación de propuestas de metodologías para la estimación de concentración de gas radón (Rn^{222}) en recintos cerrados, suelos y atmósfera, en el marco de estudios ambientales.

1.5 HIPÓTESIS

- I. El costo de los equipos es el principal factor de selección de estos para ser considerados en el diseño de la cámara de calibración de la metodología.
- II. La determinación del coeficiente de adsorción de gas radón en carbón activado permite seleccionar de manera previa al carbón activado que presenta la mayor capacidad de adsorción.
- III. Las consideraciones previas al muestreo de gas radón en recintos cerrados son iguales a las consideradas en el muestreo de gas radón en estudios ambientales.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.

Para llevar a cabo la propuesta de metodología para realizar estimaciones de concentraciones de gas radón en recintos cerrados y estudios ambientales, es necesario describir en la investigación: las generalidades del radón (Rn^{222}), sus isótopos, las diferentes fuentes naturales que generan este gas, además de los efectos que causa el contenido de radón en la salud de las personas, toda esta información se explica a detalle en el siguiente capítulo.

También se presentan las generalidades del carbón activado, su historia, la descripción de la adsorción y difusión de radón, al mismo tiempo se hace una esquematización de los métodos de medición de radón exhalado y se detallan las principales técnicas para medir radón con principio de carbón activado, además se menciona la reglamentación radiológica concerniente al radón en aire. Por último, se presentan algunos parámetros para la validación de la metodología.

2.1 RADÓN.

El radón (Rn^{222}) es un gas noble radiactivo de origen natural que se forma como el producto de la desintegración del radio (Ra^{226}), perteneciente a la cadena de desintegración radiactiva del uranio (U^{238}). Se trata de un gas inerte, emisor de partículas alfa, generado tras sucesivos decaimientos a partir del uranio (U^{238}), que es el isótopo natural más abundante del uranio. Las rocas y suelos que constituyen la corteza terrestre contienen trazas de uranio en proporción variable con su naturaleza y composición, y proporcionan por tanto una fuente continua de radón.

El radón es un gas incoloro e inodoro, que tiende a concentrarse en interiores, como viviendas, escuelas y lugares de trabajo, emana fácilmente del suelo y pasa al aire donde se diluye; de este gas se conocen tres isótopos: el radón (Rn^{222}), el torón (Rn^{220}) y el actinón (Rn^{219}), de los cuales el que tiene mayor significado radiológico

es el radón (Rn^{222}), su periodo de desintegración de 3.825 días permite que este gas migre al aire y se adhiera a las partículas de polvo, que al ser inhaladas durante un tiempo prolongado pueden provocar cáncer de pulmón.

2.1.1 Isótopos.

El radón es el elemento químico de número atómico 86. Existen tres isótopos de este elemento en la naturaleza, el radón (Rn^{222}), el torón (Rn^{220}) y el actinón (Rn^{219}).

- a. El radón (Rn^{222}) proviene de la cadena de desintegración del uranio (U^{238}) y tiene un periodo de semidesintegración de 3.825 días.¹
- b. El torón (Rn^{220}) proviene de la serie de desintegración del torio (Th^{232}) y tiene un periodo de semidesintegración de 54.5 segundos.
- c. El actinón (Rn^{219}) proviene de la desintegración del actinio (U^{235}) y tiene un periodo de semidesintegración de 3.92 segundos (Marrot, 2019).

El radón (Rn^{222}) decae emitiendo partículas alfa de 5.49 MeV, que a su vez originan, tres emisores de partículas alfa el Po^{218} , Po^{214} y Po^{210} cuyas energías son de 6.0, 7.69 y 5.3 MeV respectivamente; a medida que estas partículas se desintegran su energía provoca un mayor riesgo de afectación por inhalación o ingesta de radón en los seres humanos, para mayor comprensión del ciclo de desintegración del radón, se describe en la Figura 2.1 la serie radiactiva natural del uranio(U^{238}) y los distintos isótopos que la conforman.

¹ Radiación α : Son núcleos de helio cargados positivamente; tienen una energía muy elevada y muy baja capacidad de penetración y las detiene una hoja de papel.

Radiación β : es un electrón o positrón de alta energía y alta velocidad emitido por la desintegración radiactiva de un núcleo atómico durante el proceso de desintegración beta. Hay dos formas de desintegración beta, decaimiento β^- y emisión β^+

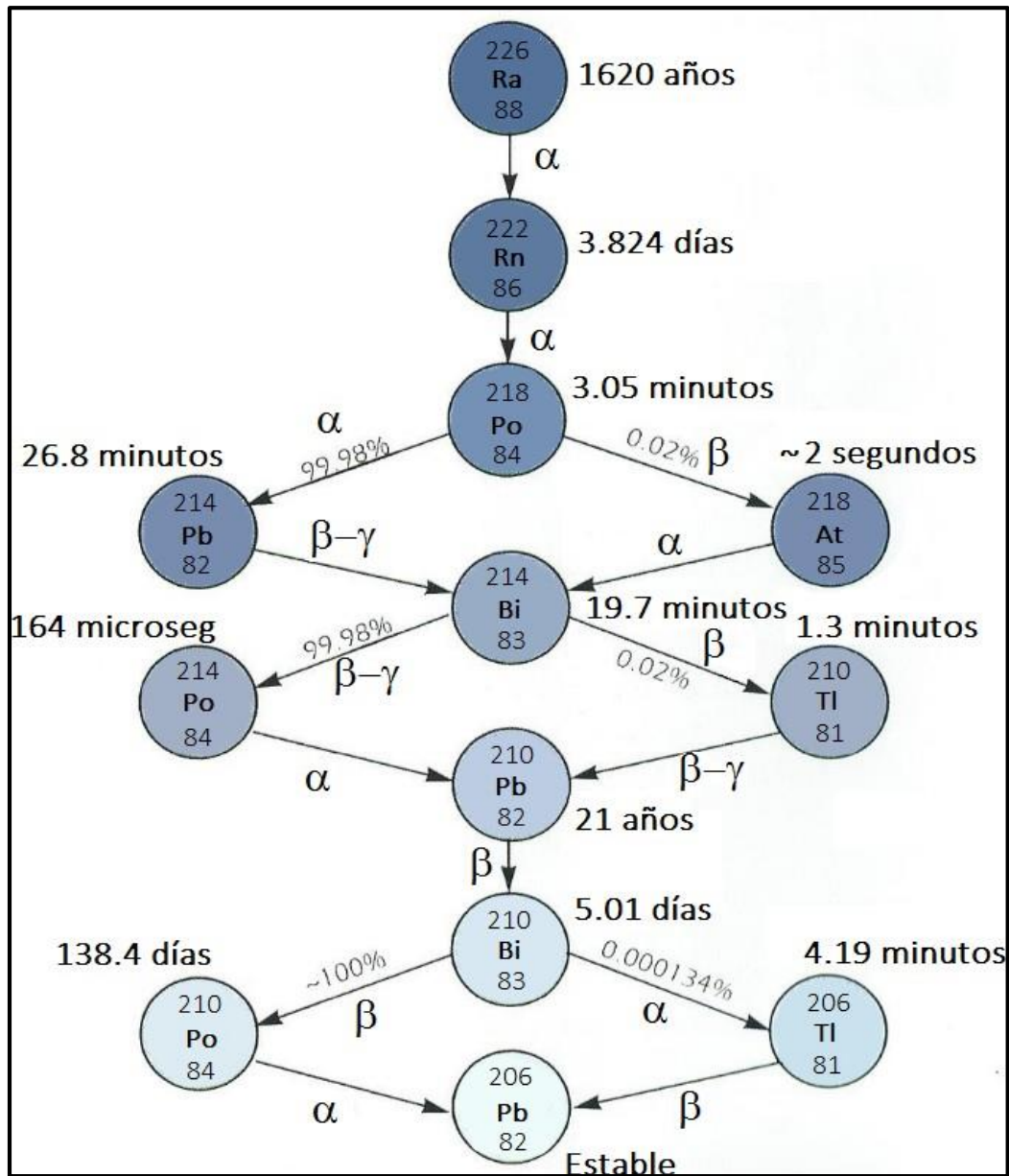


Figura 2.1: Serie radiactiva natural del uranio (U^{238})². Fuente: (Fuente Lastra, 2016).

² Se muestran los elementos, el tipo de decaimiento (alfa, beta y gamma) y los periodos de semidesintegración. En los casos que existen varias vías de desintegración se muestra la probabilidad de cada modo.

2.1.2 Propiedades.

El radón es un gas noble con una configuración electrónica en su última capa externa de $6s^26p^6$, el radón en la naturaleza se presenta como un gas casi químicamente inerte, comparado con otros gases nobles es el más pesado y tiene el mayor punto de fusión, punto de ebullición, temperatura crítica y presión crítica (véase la Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Propiedades físicas del Rn²²².

Propiedad	Valor
Punto de ebullición	-61.8 °C
Punto de fusión	-71 °C
Temperatura crítica	104 °C
Presión crítica	62 atm

Fuente: (Cothorn & Smith, 1987).

Los tres isótopos naturales del radón presentan propiedades fisicoquímicas distintas, presentadas en resumen en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Principales propiedades fisicoquímicas de los isótopos Rn²²², Rn²²⁰ y Rn²¹⁹.

Parámetro	Símbolo	Rn ²²²	Rn ²²⁰	Rn ²¹⁹
Periodo de semidesintegración	$t_{1/2}$	3.8232 d	55.8 s	3.98 s
Constante de desintegración	λ	$2.0984 \times 10^{-6}/s$	$1.242 \times 10^{-2}/s$	$1.74 \times 10^{-1}/s$
Energía	-	5.49 Mev	6.29 Mev	6.42 Mev
Partícula emitida	-	α	α	α
Coeficiente de difusión en aire	D_{MA}	$1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/s$		
Coeficiente de difusión en agua	D_{MW}	$1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/s$		

Fuente: (Noverques Medina, 2017).

2.1.3 Fuentes.

El radón (Rn^{222}) es un gas radioactivo que proviene de la descomposición natural del uranio (U^{238}), se encuentra en el suelo, en el agua y en viviendas y edificios. A continuación, se describen a detalle cada una de las fuentes de radón en superficies con o sin edificaciones establecidas.

2.1.3.1 El terreno.

El radón se produce de forma natural en el subsuelo, y emana a la superficie con mayor o menor facilidad dependiendo del tipo de suelo. La producción de radón se da más en zonas graníticas que en las arcillosas o calcáreas, la causa es por el contenido de uranio y torio en el granito que es mayor que en otros tipos de piedras como las areniscas, carbonatadas o basálticas (véase la Tabla 2.3).

Tabla 2.3: Concentraciones de uranio en función del tipo de roca.

Tipo de roca	Concentración de uranio (U^{238}) (ppm)
Basálticas	1.0
Granitos	5.0
Arcillas	3.7
Arenas	0.5

Fuente: (Quindós Poncela, 1995).

Existe más exhalación en suelos porosos, donde el gas encuentra con facilidad salida al exterior, que en suelos compactos o arcillosos que tienen menor porosidad y permeabilidad. Los suelos graníticos muy fracturados también emanan más radón que los graníticos compactos, debido a que el radón no sale de rocas de granito compactas sino de las muy fracturadas (ISG, s.f).

2.1.3.2 El agua.

El gas radón puede disolverse en aguas subterráneas desde donde es transportado hacia ríos, manantiales, estanques, etc. El gas radón disuelto en agua puede ser liberado a la atmósfera, permitiendo un aumento de la concentración en espacios cerrados (Noverques Medina, 2017).

2.1.3.3 Fuentes de radón en viviendas.

El radón asciende desde el suelo al aire y se infiltra en las viviendas a través de las grietas en pisos sólidos, juntas de la construcción, grietas en las paredes, espacios en los suelos suspendidos, espacios alrededor de las cañerías de servicios, cavidades en el interior de las paredes y en el suministro del agua (véase la Figura 2.2). Las dos fuentes principales de radón en el aire contenido en el interior de la vivienda son el suelo y el suministro de agua (debido a la desgasificación del gas). En comparación con el radón que entra a la vivienda a través del agua, el radón que penetra por el suelo representa un riesgo mucho más grave. Investigaciones científicas han demostrado que el riesgo de contraer cáncer de pulmón por respirar aire con radón es mucho mayor que el riesgo de contraer cáncer de estómago por la ingesta de agua con radón (EPA, 2017).

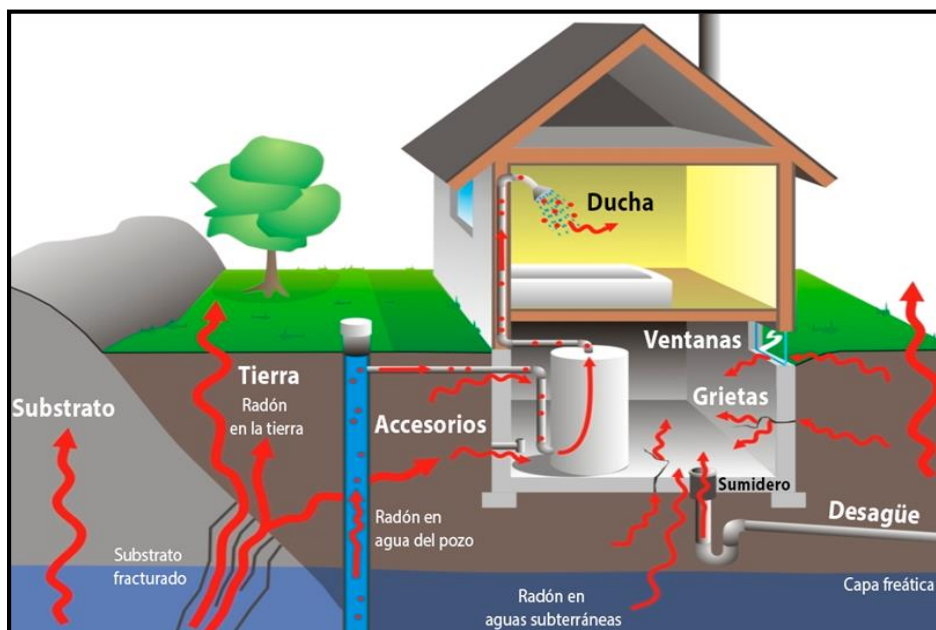


Figura 2.2: Típicas fuentes de radón y sus rutas de entrada en una vivienda. Fuente: (Galicia Ambiental, 2019).

2.1.3.4 Fuentes de radón en edificios.

El radón se filtra en los edificios a través de grietas en el subsuelo, en la unión de la solera o pavimento en contacto con el suelo y los muros perimetrales, en espacios alrededor de las tuberías o cables, pequeños poros que presentan los parámetros de los muros contruidos con bloques de hormigón huecos, cámaras ventiladas en muros de cierre, colectores, bajantes y desagüe (véase la Figura 2.3). En general el radón suele alcanzar concentraciones más elevadas en las dependencias ubicadas en plantas subterráneas o en las que están en contacto directo con el terreno.

La mayor exposición al radón en el interior de los edificios depende de:

- a. La cantidad de uranio que contienen las rocas y terreno del subsuelo.
- b. Las vías que el radón encuentra para infiltrarse en el interior de los edificios.

- c. La tasa de intercambio de aire entre el interior y exterior, que depende del tipo de construcción, los hábitos de ventilación de sus habitantes.



Figura 2.3: Típicas fuentes de radón y sus rutas de entrada en un edificio. Fuente: (Marrot, 2019).

2.1.4 Emanación, transporte y exhalación de radón.

En las rocas al interior de la tierra se forma el radón como consecuencia del decaimiento radiactivo del radio, su vida media es larga en comparación con los otros isótopos y lo suficientemente para que pueda moverse desde la roca donde se produce hasta alcanzar el aire. Cuando se produce radón algunos de sus átomos que se encuentran en el espacio intersticial entre los granos del sólido consiguen escapar (emanación), inmediatamente después de su liberación estos átomos son transportados hacia la superficie del suelo mediante difusión o advección a través del terreno (transporte), para ser liberados a la atmósfera (exhalación). En la Figura 2.4 se muestra un esquema del proceso de liberación de gas radón a la superficie.

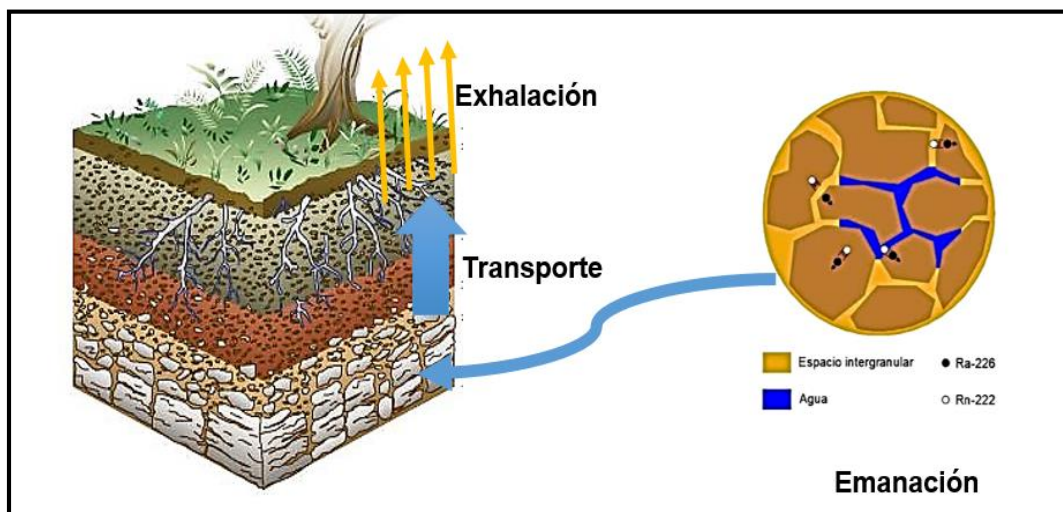


Figura 2.4: Proceso de liberación de radón a la atmósfera. Fuente: (Noverques Medina, 2017).

En los siguientes párrafos se describen los procesos de emanación, transporte y exhalación de radón.

2.1.4.1 Emanación.

En este proceso los átomos de radón escapan de los gránulos al espacio intersticial que existe entre ellos. El escape del gas radón se produce a partir de la energía con la que salen los átomos al desintegrarse el radio, este proceso es llamado proceso de retroceso cuyo comportamiento en sólidos y gases es diferente. En sólidos, el rango de retroceso del radón es pequeño, por lo que los átomos consiguen escaparse; para líquidos y gases (agua y aire), las distancias de retroceso son diferentes a las distancias en los sólidos, lo que supone que en función del medio en el cual se encuentre el radón, podrá escapar o no.

Para poder caracterizar el comportamiento físico del radón en los diferentes materiales es necesario definir el coeficiente de emanación, como la fracción de átomos de radón producidos a partir de la desintegración radiactiva del radio que emigran desde un gránulo del material hasta el espacio intersticial de los poros (Franco, s.f)

Son numerosos los factores que afectan el fenómeno de emanación, pero los principales son:

- a. El coeficiente de emanación: varía en función del tipo de material y de los gránulos de mineral.
- b. El tamaño de los gránulos del mineral: a menor tamaño, el átomo de radón presenta mayor facilidad para escapar hacia el espacio intersticial.
- c. Contenido de humedad: a mayor humedad, mayor contenido de agua tendrán los poros de los materiales y la probabilidad de que el átomo de radón sea frenado es mayor.

2.1.4.2 Transporte.

Durante el proceso de transporte se da el movimiento de los átomos emanados del suelo a la superficie, el transporte del gas radón a través de los materiales, se produce por difusión o convección.

- a. Difusión: se produce el movimiento del gas radón desde una zona de alta concentración a una zona de baja concentración. Este movimiento varía en función de la diferencia de concentraciones entre un lugar y otro. El transporte del gas radón se relaciona con su concentración por medio de la ley de difusión de Fick, mostrada en la Ecuación 2.1

$$J=n*D\frac{dC}{dz} \qquad \text{Ec. 2.1}$$

siendo

J : tasa de emanación de radón (Bq/m²s)

n : porosidad del medio

D : coeficiente de difusión del radón en el medio (m^2/s)

C : concentración de radón en los poros del medio (Bq/m^2)

z : distancia en la dirección de la difusión (m)

- b. Movimiento por convección: el flujo convectivo se produce por la diferencia de presiones que existe entre el espacio en el que el radón se encuentra confinado y la atmósfera o el interior de un edificio. El transporte convectivo depende también de la permeabilidad del medio (Noverques Medina, 2017).

2.1.4.3 Exhalación.

En el proceso de exhalación los átomos de radón transportados a la superficie del suelo son emitidos a la atmósfera.

El proceso de liberación a la atmósfera se define mediante la tasa de exhalación Φ , definida como la concentración de radón que se libera por unidad de superficie durante un tiempo determinado (Bq/m^2*s). La tasa de exhalación depende de los factores que influyen tanto en el coeficiente de emanación, como en el transporte de radón. Para realizar un estudio en campo de la exhalación de radón, se deben de tener en cuenta las condiciones meteorológicas descritas en la figura 2.5, al momento de la medición, (Noverques Medina, 2017).



Figura 2.5: Condiciones meteorológicas que influyen en las mediciones de exhalación de gas radón. Fuente: (Noverques Medina, 2017).

2.1.5 Uso de radón como trazador en ciencias medioambientales.

El gas radón puede ser utilizado como un trazador para procesos medioambientales esto significa que la extracción de muestras o un monitoreo continuo de las concentraciones de radón permite una evaluación de diferentes tipos de fenómenos dinámicos en aire y agua (Fuente, González, Gutiérrez, Quindos y Sainz, 2013).

2.1.5.1 Radón como trazador atmosférico.

La aparición de radón en la atmósfera fue descubierta poco después de 1990. Sin embargo, su distribución en espacio y tiempo, su estado físico como un componente atmosférico y su participación en la dinámica de la atmósfera todavía no son completamente comprendidas. Recientemente ha incrementado el interés en este campo. La determinación de la concentración en el aire de productos hijos de vida corta del radón es importante en la solución de problemas relacionados al ambiente para evaluar el origen y trayectoria de masas de aire o lavado de aerosoles atmosféricos por lluvias (IAEA, 2012).

En general, cuando el radón llega al aire atmosférico se difunde rápidamente. La concentración típica en la atmósfera es del orden de $10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, aunque puede variar en un amplio rango de valores, entre 1 y $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, dependiendo de la exhalación de radón de cada terreno. Existen diversos factores que condicionan las concentraciones de radón en el exterior, por ejemplo, las condiciones meteorológicas, la temperatura del suelo y del aire exterior, la presión atmosférica, la humedad y la velocidad del viento. Un factor que influye mucho en la exhalación del radón a la atmósfera son las variaciones de la presión atmosférica. Cuando la presión disminuye, la exhalación aumenta debido al fenómeno de bombeo de aire y, en cambio, cuando la presión aumenta, el aire atmosférico tiende a penetrar en el suelo, lo que frena la salida del radón. Otro parámetro es la distancia de la fuente de radón respecto a la superficie, ya que la concentración de radón disminuye al aumentar ésta, por el propio proceso de dilución. En algunas zonas continentales donde hay fuentes de radón importantes o en el caso de determinadas condiciones meteorológicas, como la inversión térmica o épocas de poca precipitación, la concentración de radón en la atmósfera puede llegar a alcanzar valores elevados. En cambio, en zonas oceánicas, esta concentración presenta unos valores muy bajos, debido básicamente a la poca presencia de radio en el agua de los océanos, y a la alta solubilidad del radón en el

agua a bajas temperaturas. De esta forma, la concentración de radón en zonas costeras es, en general, menor que en zonas continentales. Estos comportamientos ofrecen la posibilidad de utilizar el gas radón para el estudio de los movimientos de masas de aire en la atmósfera (Hernández, 2015).

2.1.5.2 Radón en cuevas.

Debido a su estado gaseoso y su gran concentración dentro de la tierra, el radón escapa a través de los intersticios del suelo a la atmósfera con una velocidad de exhalación de $40 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (UNSCEAR, 2008). Cuando esta exhalación ocurre en lugares con poca ventilación. Existen modelos para calcular la ventilación natural en una cueva propuesta por Watkins & Wilkening (1976). La variación de concentración en el aire de la cámara de una cueva puede ser expresado como la suma de la producción causada por la exhalación de radón desde las superficies rocosas, la desintegración radioactiva y la pérdida de radón resultantes de la ventilación natural (Fuente et al., 2013).

2.1.5.3 Radón como precursor de terremotos y fallas latentes.

En años recientes se ha visto un incremento en el interés de estudiar la utilidad del radón en el área de geología para su utilización como una herramienta para estimar las probabilidades para eventos de riesgo geofísico como terremotos o actividad volcánica. Para este propósito muchas anomalías de radón ante terremotos han sido observadas y estudiadas en el gas del suelo (IAEA, 1993), así como en aguas subterráneas y manantiales.: “Investigaciones hidrogeológicas, hidrológicas e hidroquímicas en el Lago de Coatepeque” (GFA Consulting Group, 2006). Se han desarrollado métodos pasivos para la obtención de indicadores de radón y algunos otros modelos han sido propuestos como una explicación de los datos experimentales de campo. No solamente el estudio de las fallas activas es importante en términos del

análisis de riesgos para un área particular, sino que también la identificación de algunas fallas consideradas como latentes (Fuente et al., 2013).

2.1.5.4 Radón en campos geotérmicos.

En la etapa de prospección geotérmica un método complementario, consiste en la determinación de la concentración de radón el cual es transportado a la superficie por geo-gases (formado por la actividad termodinámica) desde el reservorio caliente. Debido a que la vida media de este trazador natural (3.825 días), su alta concentración indica sitios de fallas recientemente abiertas, y la existencia de permeabilidad en el suelo, lo cual mejora la comprensión de la resistividad, debido a que las sustancias salinas en algunas áreas pueden haber sido transportadas por geo-fluidos a través de permeación previa en el campo geotérmico.

En conclusión, el radón es buen trazador para diferentes procesos ambientales, y mientras en este momento el principal interés en este gas está relacionado a la protección radiológica, otro campo es el estudio de incrementar la disponibilidad de herramientas analíticas y sistemas de medición atmosféricos que agreguen al entendimiento del radón como un componente trazador de medio ambiente (Fuente et al., 2013).

2.1.5.5 Radón en los balnearios radiactivos.

Las aguas termales de origen natural han sido valoradas y usadas en diversas partes del mundo por sus propiedades curativas (Marteinsson & Thorolfsdottir, 2013). Una piscina de agua termal natural se define como aquel ambiente recreativo que contiene aguas geotermales que no han sido esterilizadas, irradiadas o que no han recibido ningún tipo de tratamiento (WHO, 2006).

Los balnearios termales han promovido los potenciales efectos benéficos para la salud humana y se sugieren como un tratamiento para trastornos o enfermedades como artritis reumatoide, trastornos endocrinos y metabólicos, afecciones vasculares y padecimientos geriátricos. La utilización de aguas termales en aspectos de salud humana se identifica bajo diversas modalidades terapéuticas como hidroterapia, fisioterapia, fangoterapia y balneoterapia (Bálint et al., 2004). Las aguas termales pasan a través de fallas geológicas asociadas con algunas anomalías radiactivas (Santiago, 2004). El agua normalmente proviene de capas profundas ricas en radio (Ra^{226}); las cuales, además transportan radón (Rn^{222}) disuelto que proporciona la mayor parte de radón en el aire (Colmenero et al., 2015).

Las aguas termales se deben a la infiltración de aguas meteóricas que, al descender a través de fracturas o fallas geológicas, aumentan su temperatura debido al gradiente geotérmico. La circulación profunda enriquece a estas aguas termales con elementos radiactivos procedentes de minerales uraníferos emplazados en diferentes partes de la sección geológica, principalmente en su porción volcánica (Martínez, 1983).

Ayala (2009) señala que los pacientes que inhalan directamente radón en baños termales, pueden adquirir una importante dosis de radiación en su sistema respiratorio debido a la desintegración del radón en el epitelio bronquial, aumentando en consecuencia, el riesgo de contraer cáncer de pulmón. Incluso una pequeña cantidad de radionúclidos ya sea ingerida o inhalada puede ocasionar una amenaza para la salud. Las partículas alfa, con bajo poder de penetración del radón tiene un alto poder ionizante y sus energías varían de 4 a 6 MeV. Dentro del cuerpo, las partículas alfa ionizan y excitan los átomos del tejido depositando su energía a medida que el radón decae (ICRP, 1990) y, en consecuencia, se pueden presentar efectos bionegativos según la comunidad médica de los Estados Unidos de Norteamérica (Martín y Navarro, 2010).

2.1.6 Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes.

Las radiaciones ionizantes, al interactuar con el organismo, provocan diferentes alteraciones en el mismo debido a la ionización provocada en los elementos constitutivos de sus células y tejidos. Esta acción puede ser directa, produciéndose en la propia molécula irradiada, o indirecta si es producida por radicales libres generados que extienden la acción a otras moléculas. Lo que sucede normalmente es una mezcla de ambos procesos. El daño biológico producido tiene su origen a nivel macromolecular, en la acción de las radiaciones ionizantes sobre las moléculas de ADN que juegan una importante función en la vida celular. Esta acción puede producir fragmentaciones en las moléculas de ADN, dando origen a aberraciones cromosómicas, e incluso a la muerte celular, o bien puede ocasionar transformaciones en la estructura química de las moléculas de ADN dando origen a mutaciones, que producen una incorrecta expresión del mensaje genético (INSHT, 2008).

2.1.6.1 Factores físicos que influyen en la respuesta celular frente a la radiación.

- a. **Calidad de la radiación.** Una determinada dosis de radiación va a producir un daño biológico diferente dependiendo de la transferencia lineal de energía (LET) de la radiación incidente. Así, a medida que aumenta el valor de la LET de la radiación, se producen lesiones cada vez más complejas en la estructura del ADN y por tanto más difíciles de ser reparadas. Es por ello, por lo que para radiaciones de alta LET, una misma dosis de radiación produce mayor muerte reproductiva en la población de células irradiadas que la misma dosis de radiación de baja LET (véase la Figura 2.6) (CIEMAT, 2013).

- b. **Tasa de dosis.** Para radiación de baja LET, las tasas de dosis altas son más eficaces que las tasas de dosis bajas en cuanto a la producción de lesiones. Esto es debido a que las tasas de dosis bajas permiten que se produzca la reparación de las lesiones, evitando la acumulación del daño necesario para que tenga lugar la muerte de la célula (véase la Figura 2.6).

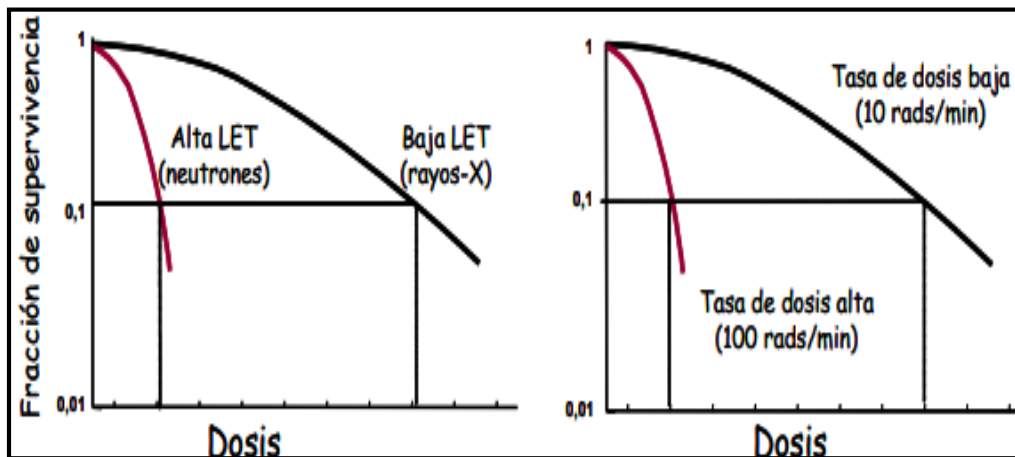


Figura 2.6: Influencia de la dosis y tasa de dosis en la respuesta celular (supervivencia) frente a la radiación. Fuente: (CIEMAT, 2013).

Como consecuencia de la exposición a radiación la célula puede no morir, sino verse modificada (mutada), hablándose en estos casos de efectos estocásticos (véase la Figura 2.7). Estos efectos ocurren tras exposición a dosis moderadas y bajas de radiación y se ponen de manifiesto a medio o largo plazo. La gravedad de los efectos estocásticos no es proporcional a la dosis recibida, pero sí la probabilidad de que tenga lugar el efecto. Aunque siguen existiendo discrepancias al respecto, para la estimación de riesgos de efectos estocásticos se considera que no existe dosis umbral para su aparición (CIEMAT, 2013).

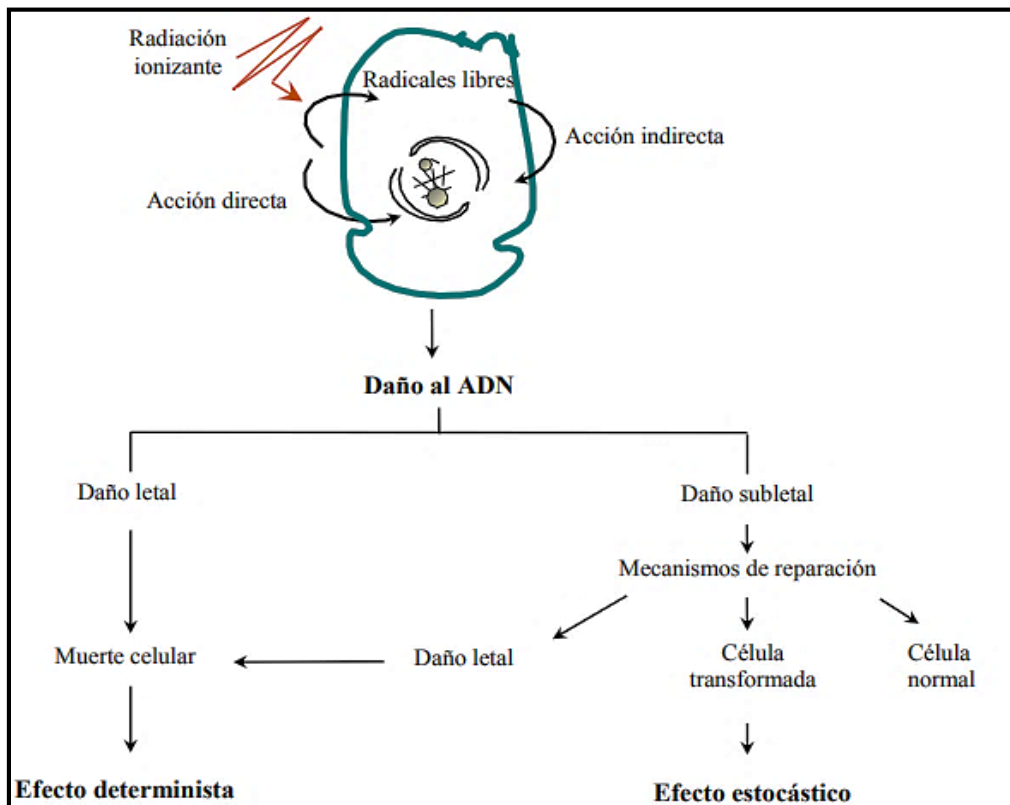


Figura 2.7: Esquema de las consecuencias de la interacción de la radiación ionizante con los componentes celulares. Fuente:(CIEMAT, 2013).

2.1.6.2 Efectos del radón (Rn^{222}) contenido en el aire, sobre la salud de las personas.

De acuerdo a la EPA (2017), la exposición al radón es la segunda causa principal de cáncer de pulmón. Por otro lado existe una relación dosis-respuesta lineal: significando, por ejemplo, que el riesgo cáncer de pulmón aumenta de manera proporcional al aumento de la exposición al radón; en general, se ha establecido que el riesgo de cáncer de pulmón aumenta un 16% con cada incremento de 100 Bq/m³ en la concentración media de radón a largo plazo (ISTAS, 2017).

El radón es un gas que no tiene color ni olor; este gas se descompone en partículas radioactivas (polonio-218, polonio-214 y plomo-214) que pueden quedar atrapadas en los pulmones al respirar (véase la Figura 2.8), mientras estas partículas se van descomponiendo las mismas liberan pequeñas explosiones de energía dañando los tejidos de los pulmones e induciendo cáncer pulmonar (EPA, 2017).

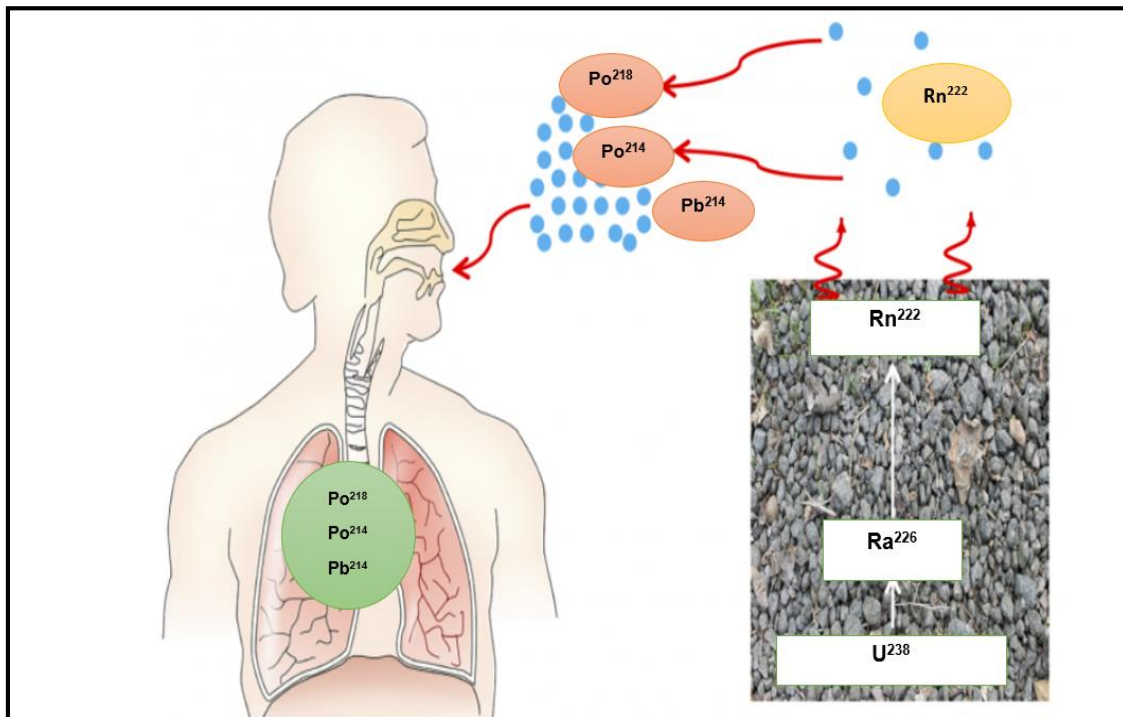


Figura 2.8: Ruta que siguen las partículas de la progenie del radón antes y después de ingresar a los pulmones. Fuente: (Marrot, 2019).

2.1.6.3 Prevención y mitigación del radón en viviendas o edificios (OMS, 2015).

Para lograr una reducción del riesgo de inhalación de radón, se necesitan tanto estrategias de prevención (en viviendas nuevas) como de mitigación (en viviendas existentes), tanto las fuentes del radón como sus concentraciones y mecanismos de transporte influyen en la elección de estrategias de prevención y mitigación. El

control del radón debe aspirar a una reducción del riesgo en la población inmersa en los edificios, viviendas construidas o planificadas a futuro, donde se haya detectado presencia de radón; para ello se deben organizar las medidas de prevención y mitigación del radón.

A. Organización de las medidas de prevención y mitigación del radón.

La organización de los elementos para la prevención y mitigación del radón son claves para el éxito de la implementación de un sistema integrado que ayude a disminuir la concentración de radón en edificios o viviendas; es por ello que se enumeran y describen dichos elementos a continuación.

I. Las medidas de control del radón deben abarcar diversos tipos de edificios.

Como, por ejemplo:

- a. Viviendas nuevas y existentes, ya que la mayor exposición al radón suele producirse en los hogares.
- b. Edificios en los que sea probable que el público permanezca durante períodos prolongados, como escuelas, centros preescolares, edificios de titularidad o uso público y establecimientos de alojamiento.

II. Deben estudiarse los edificios para identificar las estrategias de control del radón más eficaces para la prevención y la mitigación.

Los sistemas estructurales, de cimentación y ventilación, así como las prácticas de construcción, varían de una región a otra. En particular, estos estudios deben utilizarse para desarrollar:

- a. Normas y reglamentos de prevención del radón, como por ejemplo códigos de construcción aplicables a las viviendas nuevas.
- b. Normas de mitigación del radón y requisitos para la aplicación de medidas correctivas en viviendas existente.

III. La contribución de las distintas fuentes de radón varía de una región a otra.

Pueden considerarse los siguientes mecanismos como los principales:

- a. Infiltración de gases del suelo por diferencia de presiones.
- b. Emanación de radón procedente de los materiales de construcción.
- c. Transporte de radón a través del agua.

IV. Debe ponerse en práctica una formación y certificación adecuada de los profesionales de la construcción para garantizar la eficiencia de las medidas de prevención y mitigación.

Considerados los aspectos generales de la organización de las medidas de prevención y mitigación del radón, se procede a establecer los criterios para el diseño de los sistemas de control del radón que aseguren la eficacia de las medidas.

B. Criterios de diseño para los sistemas de control del radón.

Tanto los sistemas de prevención del radón como los destinados a su mitigación deben cumplir los criterios de diseño presentados en la Figura 2.9.



Figura 2.9: Criterios de diseño para los sistemas de prevención y mitigación de radón. Fuente: (OMS, 2015).

C. Estrategias de prevención y mitigación del radón en nuevas y antiguas construcciones.

La mayoría de las estrategias de prevención contemplan pasos para limitar la infiltración de gas desde el suelo debido a diferencias en la presión de aire entre el suelo y el espacio habitado en el interior. Para que sean eficaces, las estrategias de prevención del radón se deben tener en cuenta la combinación concreta de prácticas constructivas, fuentes de radón y mecanismos de transporte existente en la región donde se cimentarán las nuevas construcciones, en cambio para que sean eficaces las estrategias de mitigación del radón deben adaptarse a la combinación concreta de características de las viviendas y edificios, zona climática, fuentes de radón y mecanismos de transporte.

En la Figura 2.10 se esquematizan las principales estrategias de prevención y mitigación de radón en viviendas, haciendo énfasis a los materiales que utiliza cada estrategia.



Figura 2.10: Principales estrategias de prevención y mitigación de radón. Fuente: (OMS, 2015).

2.2 CARBÓN ACTIVADO.

Carbón activado en su más amplio sentido es un término que incluye un rango de materiales de carbono amorfo que exhiben un alto grado de porosidad. Además de ser adsorbentes únicos y versátiles, son usados extensamente para la remoción de olores, colores y sabores y otras impurezas orgánicas e inorgánicas. Algunas de las aplicaciones específicas del carbón activado son:

- a. Remoción de impurezas que causan color, olor y sabor en el agua potable.
- b. Elaboración de mascarillas para gases donde se impregnan los compuestos orgánicos tóxicos impidiendo que sean respirados por el hombre.
- c. Concentración de un material (oro o plata) contenido en una solución diluída, por medio de adsorción para posterior recuperación del material por elución.
- d. Remoción de olores en campanas para cocina, plantillas para zapatos, sanitarios, basureros y sistemas de aire acondicionado.
- e. Remoción de compuestos orgánicos en aire o gases de escape producidos en el desengrasado de metales y recubrimiento de películas.
- f. Remoción de líquidos alimenticios en jugos, vinos, vinagres y destilados.
- g. Remoción de compuestos orgánicos tóxicos y metales en aguas residuales.
- h. Como antídoto universal para tratar intoxicaciones agudas en hospitales.
- i. Como adsorbente en la purificación de antibióticos y vitaminas.

Un método de medición de radón en aire es través de la adsorción de radón en carbón activado. Los monitores de carbón activado han ganado una amplia popularidad debido a su bajo costo y su fácil método de uso. El gas radón se difunde dentro del carbón de un lecho pasivo de carbón activado por difusión molecular.

2.2.1 Historia.

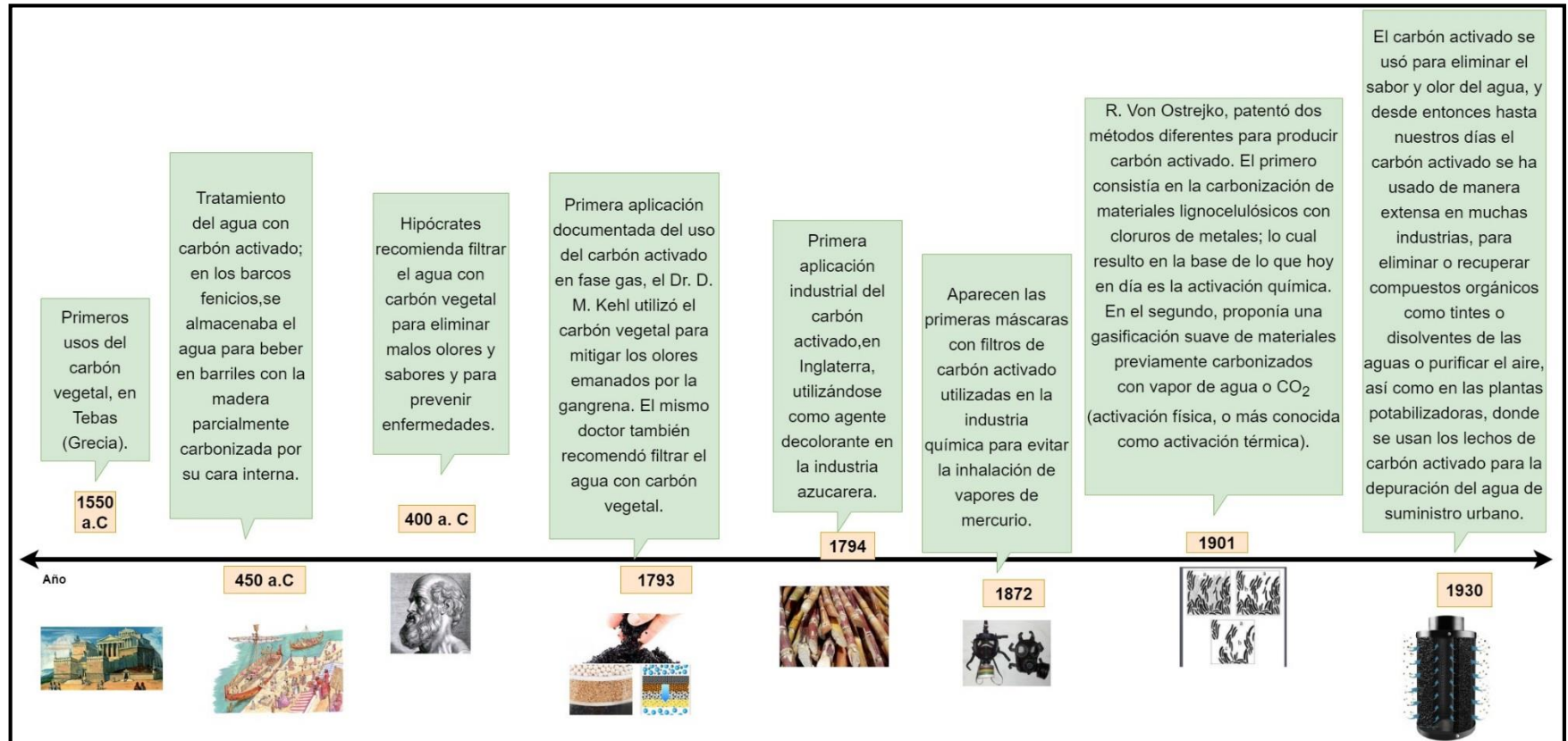


Figura 2.11: Historia del carbón activado. Fuente: (Universidad de Sevilla, 2011).

2.2.2 Carbón activado.

El carbón activado es un producto que posee una estructura cristalina reticular similar a la del grafito; es extremadamente poroso y puede llegar a desarrollar áreas superficiales del orden de 1,500 metros cuadrados, por gramo de carbón. Se obtiene por carbonización y activación de materiales orgánicos, especialmente de origen vegetal, hullas, lignitos y turbas, con el fin de obtener un alto grado de porosidad y una importante superficie intraparticular.

En su estructura interna los átomos se encuentran combinados en forma de placas graníticas, cuya representación se muestra en la Figura 2.12.

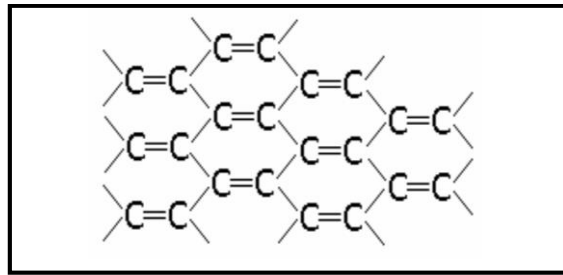


Figura 2.12: Estructura interna del carbón activado. Fuente: (Universidad de Sevilla, 2011).

Las placas están separadas y tienen distintas orientaciones, por lo que existen espacios entre ellas, a los que se les denominan poros, que brindan al carbón activado su principal característica: una gran área superficial, y por lo tanto, una alta capacidad adsorbente de gases y vapores de mezclas gaseosas o sustancias dispersas en líquido (Universidad de Sevilla, 2011).

2.2.3 Composición química.

Los principales componentes del carbón activado se muestran en la Tabla 2.4, de los cuales el carbono es el elemento que se encuentra en mayor proporción.

Tabla 2.4: Composición química del carbón activado.

Componente	Cantidad
Carbono	75-80%
Cenizas	5-10%
Hidrógeno	0.5%

Fuente: (Bastidas, Márquez y Rodríguez, 2010).

2.2.4 Formas físicas del carbón activado (Carrasco y Londa, 2018).

La forma física del carbón activado depende de la aplicación en la que se utilice, es así que existen tres formas: granular, polvo y pellets cilíndricos.

2.2.4.1 Carbón activado en polvo.

El carbón activado en polvo se aplica para purificación y clarificación de líquidos, presenta un tamaño menor o igual a 0.25 mm, generalmente es utilizado para clarificación de jarabes en la industria de las bebidas gaseosas. Este tipo de carbón presenta un área y superficie elevada. En la figura 2.13 se presenta una muestra de carbón activado en polvo.



Figura 2.13: Carbón activado en polvo. Fuente: (Alquera, s.f).

2.2.4.2 Carbón activado en forma granular.

El carbón activado en forma granular se utiliza para purificación de líquidos y gases, presenta un tamaño mayor a 0.25 mm, se emplea para eliminar el cloro del agua y para potabilización del agua (eliminación de colores y olores). Este tipo de carbón presenta área superficial elevada y amplitud de poro menor. En la Figura 2.14 se presenta una muestra de carbón activado en forma granular.



Figura 2.14: Carbón activado granular. Fuente: (Carrasco y Londa, 2018).

2.2.4.3 Carbón activado en pellets.

El carbón activado en pellets presenta una forma cilíndrica con distintas longitudes, se utiliza principalmente para purificación de gases, el diámetro varía entre 0.8 a 3 mm. En la Figura 2.15 se presenta una muestra de carbón activado en pellets.



Figura 2.15: Carbón activado en pellets. Fuente: (Pazmiño Ayala, 2007).

2.2.5 Caracterización física y química.

La caracterización física y química son todos aquellos parámetros del carbón activado, que se usan con el propósito de establecer si el carbón cumple con los estándares internacionales de calidad (Pérez y Ventura, 2019).

En la tabla 2.5 se describen los parámetros necesarios para caracterizar el carbón activado, así como también las diferentes normas que rigen la estandarización de tales parámetros, y en la Tabla 2.6 los datos técnicos del carbón activado de cáscara de coco 1100.

Tabla 2.5: Principales parámetros con los que se caracteriza el carbón activado.

Parámetro	Normativa	Descripción
Contenido de material volátil	ASTM D5832-98	Según la ASTM D5832-98, la determinación de materia volátil puede usarse como una medida relativa del grado de carbonización y el grado de carga de material volátil sobre un carbón activado que se ha usado en una aplicación de adsorción.
Densidad aparente	ASTM D2854	Es el peso en g/cm ³ de carbón totalmente seco en aire. Es decir, incluye el volumen de los poros y el del área superficial del carbón (De la Torre, Iordanov y Muñoz, 2004)
Porosidad		La porosidad es la capacidad que tienen determinados materiales de absorber o dejar pasar a través de sí ciertas sustancias en fase líquida o gaseosa, por medio de espacios vacíos presentes en su estructura (Muhye, s.f).
Humedad	ASTM D2867-99	Este parámetro es importante ya que a mayor contenido de humedad menor es el porcentaje de carbón neto (Valencia, 1999).

Continúa...

Tabla 2.5: Principales parámetros con los que se caracteriza el carbón activado (Continuación).

Parámetro	Normativa	Descripción
pH	ASTM D3838	Cuando un fluido que contiene un adsorbato se pasa a través de un lecho de carbón activado, reacciones químicas toman lugar entre el carbón activado, sus otros constituyentes no carbonosos y el adsorbato contenido en el fluido. El pH del carbón puede ser un parámetro significativo de tal reacción y, por lo tanto, puede ser una característica importante (ASTM D3838, 1999).
Contenido de cenizas	ASTM D2866-94	El contenido de cenizas es el residuo que queda después de calcinar el carbón a una temperatura elevada, hasta llegar a peso constante, y se expresa en términos de porcentaje en base seca. La cantidad de las mismas puede influir en la adsorción y en ciertas propiedades del carbón activado (Valencia, 1999).

Tabla 2.6: Datos técnicos del carbón activado de cáscara de coco 1100, fabricado a nivel industrial por Carbones Mexicanos con calidad internacional requerida.

Datos técnicos	Valor	Norma que cumple
pH	7-8	ASTM D-3838
Dureza	98-99%	ASTM D-3802
Cenizas totales	3% máx.	ASTM D-2866
Densidad aparente (g/cm ³)	0.44-0.49	ASTM D-2854
Humedad al empacar	3% máx.	ASTM D-2867

Fuente: (CARBONES MEXICANOS, s.f).

2.2.6 Adsorción con carbón activado.

En la adsorción con carbón activado, el material removido ya sea una sustancia sólida o gas se adhiere físicamente o químicamente a la superficie del material adsorbente sin penetrar en su estructura física; son muchas las sustancias que se pueden adsorber en la superficie del carbón activado, en la Tabla 2.7 se muestran algunas de estas.

Tabla 2.7: Principales sustancias o gases que se pueden fijar por adsorción en carbón activado.

Sustancias o gases que se pueden fijar por adsorción en carbón activado.	
Sustancias no polares	Aceite mineral
	Poli-hidrocarburos aromáticos
	Fenol
	Benceno
	Tolueno
	Etilbenceno
	Xileno
Sustancias halogenadas	Cloruros
	Yoduros
	Fluoruros
	Bromuros
Gases	Radón
	Dióxido de carbono

Adaptado de: (LENNTECH, 2019).

En el sistema gas-carbón activado, el proceso de adsorción es complejo e involucra algunos fenómenos fisicoquímicos que explican por qué el carbón tiene la capacidad de retener las moléculas de los gases que se encuentran en la fase fluida, en la Figura 2.16 se hace una esquematización de dicho proceso.

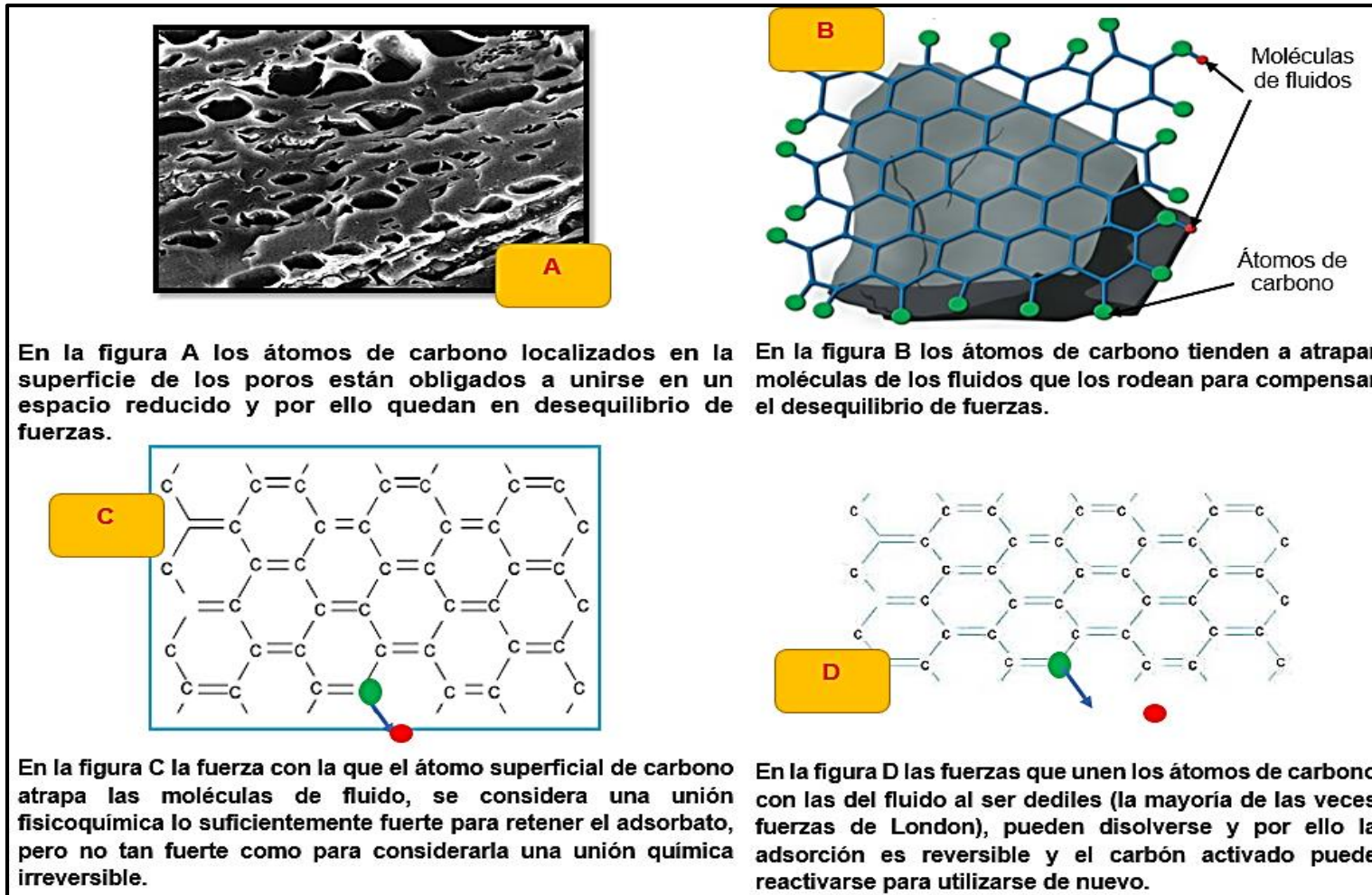


Figura 2.16: Proceso de adsorción y desorción de moléculas en carbón activado. Adaptado de: (Ciencia a conciencia, 2014).

2.2.6.1 Descripción de la adsorción de radón (Rn^{222}) en la superficie del carbón activado.

La adsorción implica la concentración de uno o más componentes de un gas o un líquido en la superficie de un sólido. El sólido (carbón activado) se denomina adsorbente y las moléculas adsorbidas en la superficie del sólido, en mayor concentración que en la fase fluida, se conocen como adsorbato (moléculas de radón (Rn^{222})) (véase la Figura 2.17). La adsorción se establece debido a las fuerzas de atracción entre las moléculas del fluido (radón gaseoso) y la superficie sólida del carbón activado. La superficie del carbón activado es una región singular, que es responsable o al menos condiciona muchas de sus propiedades. Los átomos que se encuentran en la superficie no tienen las fuerzas de cohesión compensadas, como ocurre con los átomos situados en el seno del sólido (García y Pérez, 2003).

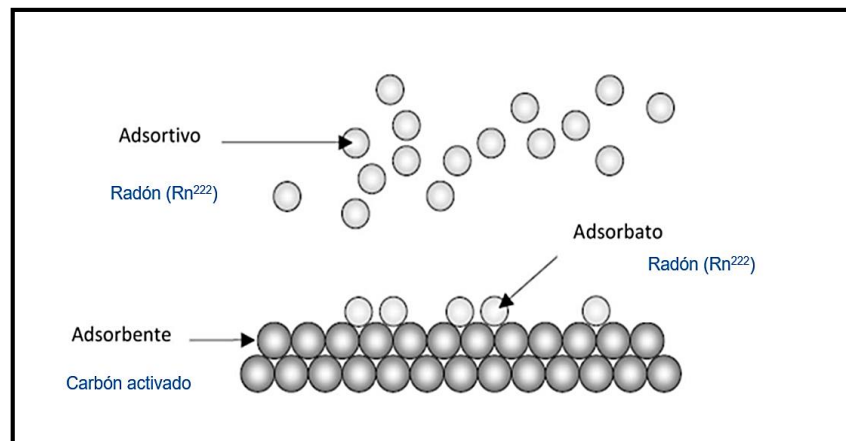


Figura 2.17: Esquema que ilustra el adsorbente, el adsorbato y el adsorativo. Fuente: (Álvarez Gutiérrez, 2016).

El proceso de adsorción transcurre en una serie de etapas sucesivas como se muestra en la Figura 2.18.

- I. Difusión externa. El adsorbato se aproxima a la superficie externa del sólido; para ello debe vencer la resistencia de una fina capa acumulada alrededor del adsorbente (interfase sólido- fluido).

- II. Difusión interna. Debido a que la superficie externa expuesta por las partículas tiende a ser inferior al 1% del total, el adsorbato migra a través de la red porosa del sólido.
- III. Adsorción del adsorbato. En esta etapa el adsorbato se adhiere a la superficie del adsorbente.

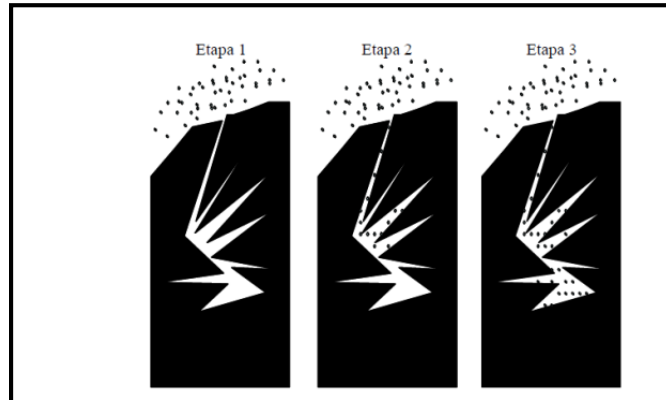


Figura 2.18: Etapas del proceso de adsorción. Fuente: (Bustamante, Orozco, Sepúlveda, Silvestre y Suárez, 2008).

El tipo de adsorción que se da en un sistema adsorbato-adsorbente depende de la naturaleza tanto del adsorbato como del adsorbente, de la reactividad de la superficie, del área superficial del adsorbente, de la temperatura y de la presión de adsorción. Existen dos tipos de adsorción:

- a) Fisisorción: las moléculas de fluido son adsorbidas en el sólido a través de fuerzas débiles, de tipo dispersivo, dipolar o interacciones de Van de Waals, similares a las responsables de la condensación de vapores.
- b) Quimisorción: Implica reacción química entre el adsorbato y el adsorbente, por lo que la unión entre ambos es mucho más fuerte.

La diferencia fundamental entre ambos es que en el caso de la fisisorción la especie adsorbida (fisisorbida) conserva su naturaleza química, mientras que durante la quimisorción, la especie adsorbida (quimisorbida) sufre una transformación para dar lugar a una especie distinta (Álvarez Gutiérrez, 2016). En la Tabla 2.8 se presentan otras diferencias entre los dos procesos.

Tabla 2.8: Diferencias entre adsorción química y física.

Fisisorción	Quimisorción
<ul style="list-style-type: none"> a. La adsorción se produce en mono o multicapa. b. Entalpia de adsorción similar a la del calor de licuefacción: 10-20 KJ mol⁻¹. c. Inespecífico: tiene lugar en cualquier sistema sólido-gas. d. Exotérmica. e. Proceso reversible: el adsorbato mantiene su identidad. 	<ul style="list-style-type: none"> a. La adsorción se produce en monocapa. b. Entalpia de adsorción característica de una reacción química: 40-400 KJ mol⁻¹. c. Especifico. d. Exotérmica o endotérmica. e. Proceso reversible o irreversible: el adsorbato puede modificar su estructura química.

Fuente: (Álvarez Gutiérrez, 2016).

2.2.7 Difusión del radón (Rn²²²) en el carbón activado.

En la Figura 2.19 se puede observar en forma esquemática un lecho de carbón activado de altura finita. Como se puede ver en esta figura, uno de sus extremos se encuentra aislado, mientras que el otro se encuentra en contacto con el aire exterior, que posee una concentración de Rn²²² igual a C₀. El Rn²²² se difunde a través del lecho de carbón recorriendo un camino tortuoso y es adsorbido en la superficie de las partículas de carbón.

Para estudiar la difusión y adsorción del gas Rn^{222} en el carbón activado se deben tener en cuenta una serie de simplificaciones. El diámetro promedio de los poros de la superficie del carbón activado es mucho mayor que el camino libre medio de la molécula de Rn^{222} que difunde. Entonces, el transporte de Rn^{222} es por simple difusión molecular predominantemente en la dirección axial, siendo despreciable la difusión radial (Ensor, Wasan, Menon, Michaels & Nagarajan, 1990).

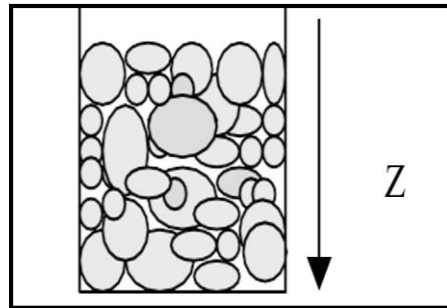


Figura 2.19: Esquema del monitor, vial de centelleo conteniendo el carbón activado.

Fuente: (Canoba y López, 2001).

La difusión axial de un gas en un medio poroso es gobernada por la ley de Fick. Según esta ley, el flujo (J) o sea la cantidad de gas que difunde por unidad de área y por unidad de tiempo, es proporcional al gradiente de la concentración.

$$J = -D \left(\frac{\partial C}{\partial Z} \right) \quad \text{Ec. 2.2}$$

Siendo D la constante de difusión.

En el caso del Rn^{222} , un gas que decae radiactivamente, la conservación de la masa y la aplicación de la Ecuación (2.2) conducen a la siguiente ecuación de difusión:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \lambda c \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde:

$C(z,t)$ = concentración de Rn^{222} ($Bq\ m^{-3}$)

t = tiempo (h)

z = distancia en la dirección axial (m)

D = constante de difusión (m^2h^{-1})

λ = constante de decaimiento del Rn^{222} (h^{-1})

La constante de difusión D , según (Underhill, 1977), puede ser escrita de la siguiente forma:

$$D = \frac{\gamma \varepsilon D_f}{\rho k} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde:

D_f = difusividad de Rn^{222} en aire ($m^2\ h^{-1}$)

γ = factor de tortuosidad

ε = fracción de volumen vacío entre partículas

ρ = densidad del carbón ($kg\ m^{-3}$)

k = coeficiente de adsorción ($m^3\ kg^{-1}$)

La Ecuación de difusión 2.4 es una ecuación diferencial parabólica en derivadas parciales de segundo orden con respecto a la coordenada z y de primer orden respecto del tiempo (t). Para una concentración de Rn^{222} constante, esta ecuación puede resolverse en forma analítica. Si en cambio la concentración de Rn^{222} es variable, la ecuación de difusión debe ser resuelta en forma numérica (Ensor, Wasan, Menon, Michaels & Nagarajan, 1990).

2.3 MÉTODOS E INSTRUMENTACIÓN PARA MEDICIONES DE RADÓN AEROTRANSPORTADO.

Existen métodos para la medición de radón en aire. Muchos de estos métodos están establecidos, y bien documentados, con un historial de desempeño en campo. A continuación, se presentan los métodos de medición disponibles, en categorías según el tipo de muestreo (muestreo simple, monitoreo continuo y métodos de muestreo integrados). En la Figura 2.20 se presenta un esquema de los métodos que conforman cada categoría.

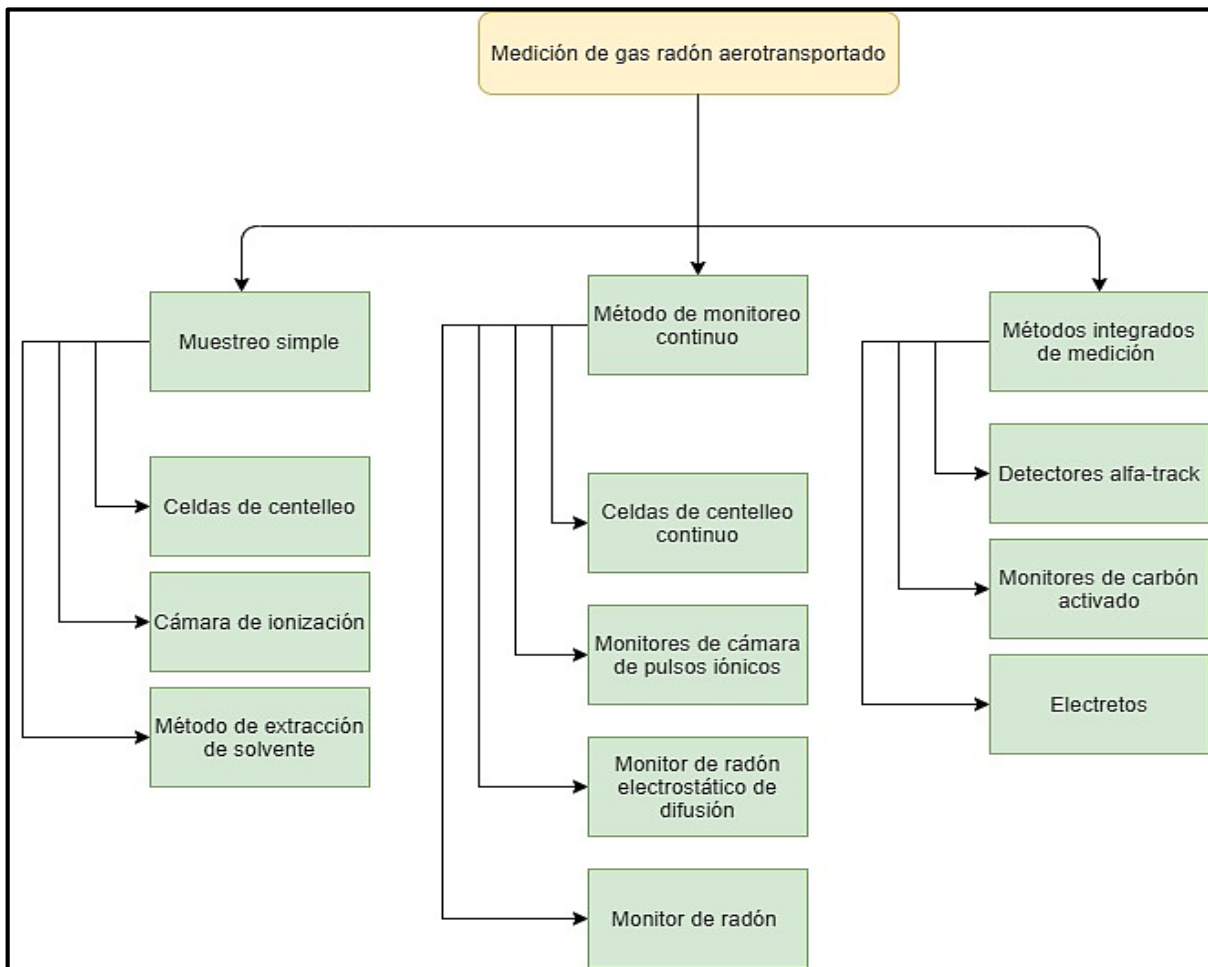


Figura 2.20: Esquema de métodos de medición de radón. Adaptado de: (Nagda, 1994).

2.3.1 Muestreo simple (toma de muestra) (Nagda, 1994).

a. Celdas de centelleo.

Uno de los métodos más ampliamente usados y aceptados para mediciones de radón tanto en el laboratorio como en el campo, es por medio de la celda de centelleo, también denominada celda de Lucas. Estas consisten en contenedores plásticos, metálicos o de vidrio que tiene superficies interiores recubiertas con una delgada capa de fosfosulfuro de zinc activado con plata (véase la Figura 2.21). Ya sea con una o dos puertos de muestreo con válvulas ajustadas al matraz para permitir el llenado con la muestra de la atmósfera. Las celdas de centelleo actualmente en uso son predominantemente cilindros circulares rectos que tiene un rango de volumen de 0.09 a 2.0 L. Algunos investigadores utilizan bolsas Tedlar o Mylar para la recolección de muestras y su subsecuente transferencia a celdas de centelleo en laboratorio, este método provee resultados aceptables.

Para uso de campo, las celdas pueden ser evacuadas en el laboratorio, luego enviadas al sitio de muestreo donde son llenadas al abrir la válvula. Alternativamente, una pequeña bomba se puede utilizar. Normalmente un filtro se ajusta a la entrada a la celda para remover productos de decaimiento del radón durante el llenado, se toma el tiempo de muestreo luego la celda es enviada al laboratorio o analizada in situ. La medición de radón con la celda de centelleo se logra con un tubo fotomultiplicador acoplado ópticamente a la ventana transparente de la celda. Las partículas alfa producidas en la celda golpean el fósforo, lo cual genera luz lo cual se convierte en corriente eléctrica por el tubo fotomultiplicador. Para el análisis, un retraso de al menos 3 horas permite el crecimiento hasta el equilibrio radioactivo de los productos de degradación de radón, Po^{218} y Po^{214} . Los centelleos del radón/productos de decaimiento del radón son contados con el tubo fotomultiplicador/ contador de impulso.

Los errores de medición con las celdas de centelleo están relacionadas a fallas en el funcionamiento del sistema de conteo, calibración inapropiada, y fugas en las juntas y las válvulas durante el transporte y almacenaje de las celdas.



Figura 2.21: Celda de centelleo pylon 600A/610A. Extraído de PYLON AB7 «detectores de celdas activas». Recuperado de <https://pylonelectronics-radon.com>.

b. Cámaras de ionización.

Cámaras de ionización de pulsos, han estado en uso por muchos años para la medición de radón en configuraciones de laboratorio, una cámara de ionización consiste en un cilindro con un campo eléctrico establecido entre dos electrodos. Cuando se llena con aire que contiene radón la radiación del decaimiento del radón y productos de decaimiento del radón ioniza el aire, causando un flujo de corriente; en la Figura 2.22 se presenta una cámara de ionización compacta.



Figura 2.22: Cámara de ionización Alpha guard. Extraído de «TECNASA TECNOLOGIASASOCIADAS AlphaGuard». Recuperado de <https://pylonelectronics-radon.com>.

c. Método de extracción de solvente.

Se ha reportado también una alternativa a la celda de centelleo que emplea un centellador de líquido frío, para medición de radón en aire. En este método, muestra de campo de aire, colectadas en bolsas plegables de muestreo de gas u otros contenedores adecuados, se pasan a través de 20 mL de una solución líquida de centelleo basada en hexano para extraer el radón, el cual es altamente soluble en solventes orgánicos fríos. El sistema de extracción, el cual consiste en una sección de desecador, un burbujeador con un disco sinterizado, y una bomba de vacío, debe ser mantenidos a $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$, en un baño de hielo seco/acetona. Después de un período de tres horas para el crecimiento de productos de decaimiento de radón las muestras son contadas con un sistema estándar de centelleo líquido.

2.3.2 Métodos de monitoreo continuo (Nagda, 1994).

Mediciones continuas o semicontinuas repetitivas de corto tiempo, son útiles en situaciones donde la concentración de radón cambia significativamente o varía rápidamente durante un lapso. Las mediciones continuas son ampliamente usadas para aplicaciones en investigación. Por ejemplo, las mediciones continuas son valiosas en estudios de los efectos de varios parámetros, como la tasa de ventilación o diferenciales de presión en las concentraciones de radón en interiores.

a. Celdas de centelleo continuo.

Las celdas de centelleo (ZnS:Ag) pueden ser ajustadas con una entrada filtrada y una bomba de aire para el uso en modo flujo continuo para realizar mediciones continuas de radón. La celda es acoplada a un tubo fotomultiplicador con electrónicos asociados para el conteo de centelleos desde la celda sobre una base conti-

nua. Los productos de decaimiento del radón se depositan en las paredes de la celda durante el flujo atraviesa la celda. Ya que poseen una vida media de aproximadamente 30 minutos, se debe hacer una corrección para el conteo para la actividad de depósitos previos de productos de decaimiento de radón; en la Figura 2.23 se presenta una celda de centelleo continuo que proporciona lecturas directas en la pantalla de inicio.



Figura 2.23: Monitor de celda de centelleo de flujo continuo PYLON AB7.Extraído de «catalogo PYLON ELECTRONICS». Recuperado de <https://pylonelectronics.com>.

b. Monitores de cámara de pulsos iónicos.

La tecnología de cámaras de pulso de iones ha sido también utilizada para mediciones continuas de radón. Hasta recientemente las cámaras de ionización no eran utilizadas de manera amplia para mediciones en campo. Estas han sido más comúnmente usadas para aplicaciones de laboratorio y en programas de calibración porque son altamente exactas. Sin embargo, los monitores continuos de radón que emplean detectores alfa de cámaras de pulso iónico ahora están disponibles comercialmente y se pueden encontrar cámaras en el mercado como la mostrada en el Figura 2.24.



Figura 2.24: Cámara de iones con software en un microcontrolador PIC. Extraído de «THEREMINO». Recuperado de <https://www.theremino.com>.

c. Monitor de radón electrostático de difusión.

Estos monitores son dispositivos basados en la difusión, para los cuales la detección de radón se basa en la colección electrostática de Po^{218} , el radón, pero no el torón o productos de decaimiento del radón, se difunden a través de una membrana de espuma, hacia un hemisferio 1L o mayor, el Po^{218} positivamente cargado, del decaimiento del radón es electrostáticamente atraído a una capa aluminizada de Mylar. Las partículas alfa del decaimiento de Po^{218} y Po^{214} se cuentan por un sistema de detección de centelleo, en la Figura 2.25 se muestra un equipo comercial de monitor de radón.



Figura 2.25: Monitor electrostático de difusión pasiva Corentium Home Radon Detector. Extraído de «Productos Airthings». Recuperado de <https://cdn2.hubspot.net>.

d. Monitor de radón (únicamente).

Este monitor (véase la Figura 2.26) utiliza colecciones electrostáticas con un electreto en un matraz de centelleo para prevenir la detección de productos de decaimiento de radón. Solo se cuentan centelleos del decaimiento radioactivo del radón.



Figura 2.26: Monitor de radón RADON SCOUT PLUS. Extraído de «Radon Market». Recuperado de <https://www.radonmarket.com>.

2.3.3 Métodos integrados de medición (Nagda, 1994).

Las mediciones de radón en las estructuras para evaluar riesgos a la salud debido a la exposición al radón han resultado en el amplio uso de dispositivos simples de muestreo pasivo para mediciones integradas. Estos dispositivos son de bajo costo, pequeños y fácil de usar haciéndolos ideales para uso en hogares estos pueden ser instalados por los ocupantes de los edificios, y analizados en un laboratorio, estos dispositivos facilitan el desempeño de investigaciones en grandes escalas por su bajo costo. Cuando estos dispositivos pasivos son utilizados apropiadamente generalmente proveen resultados confiables.

a. Detectores Alfa-Track.

Uno de los muestreadores integrados más ampliamente usados para medidas en pantalla o de seguimiento es detector Alfa-Track (ATD). Este dispositivo es pequeño, de bajo costo y fácil de usar. Estos son usados como muestreadores integrados de tiempos largos para el rango de periodos desde uno a 12 meses. Aunque también pueden ser usados en periodos cortos si las concentraciones de radón son altas.

En 1967, Geiger, reportó acerca de una insignia que utilizaba una película de nitrato de celulosa para medir radón. La insignia, denominada un detector de pistas nuclear de estado sólido, permitía que el Radón se difundiera a una cavidad central donde estaba contenida la película. Durante el decaimiento, partículas alfa del Radón y sus productos de descomposición impactaban la película, causando "pistas alfa". La película, subsecuentemente, era corroída con una solución álcali para agrandar las pistas, para luego contarlas con microscopios ópticos. Usando exposiciones a radón estandarizadas, los detectores podían ser calibrados; el número de pistas demostró ser proporcional a la concentración de Radón. Los Detectores de Pistas Alfa (DPA) consisten en un pequeño contenedor, generalmente construido de plástico, que contiene una pieza de película. Plástico conductor eléctricamente se usa por muchos fabricantes para minimizar efectos de carga provenientes predominantemente de productos de radón cargado positivamente. El diseño de los detectores varía, por ejemplo, un fabricante usa una copa hemisférica que aparentemente provee una distribución más uniforme de las pistas en la película. Todos los DPA incluyen un filtro que permite que el radón se difunda hacia el detector, pero previene la entrada de polvo y productos de descomposición del radón. El desempeño de los DPA es fuertemente afectado por la calidad de la película. Se pueden usar Nitrato de Celulosa y Policarbonato, pero el CR-39 es actualmente la película usada más ampliamente; esto es debido a que se usa para minimizar variaciones y pistas de fondo creadas por imperfecciones en el material. Los métodos de grabado por corrosión pueden

afectar la precisión y exactitud del método. De acuerdo con la literatura de uno de los fabricantes el grabado electroquímico mejora la precisión porque produce pistas más grandes que son más fáciles de distinguir que las pistas de fondo. En la figura 2.27 se presenta un Alfa Track con geometría circular.



Figura 2.27: Detector de pistas Alpha Track. Extraído de «RGC radón». Recuperado de <http://rgcradon.com>.

b. Monitores de carbón activado.

Los monitores de carbón activado han ganado mucha popularidad por su bajo costo y fácil uso para desempeñar mediciones de detección de radón en períodos cortos en interiores. El colector es simple, el radón se difunde dentro del lecho de carbón activado por difusión molecular, se instalan durante un período de 1-7 días para medir el radón. El colector es retornado al laboratorio donde rayos gamma emitidos por el decaimiento de radón son cuantificados por simples métodos de detección gamma, la respuesta de los monitores de carbón activado se ve afectada por la humedad, por lo que deben calibrarse para diferentes niveles de humedad, también deben calibrarse para todas las temperaturas que resulten probables en las condiciones reales de uso; en la Figura 2.28 se muestran tres cánister de carbón activado de diferentes tamaños.



Figura 2.28: Cánister de carbón activado. Extraído de «RadonSpecialist». Recuperado de <https://radonspecialist.org>.

c. Electretos.

Este método consiste en una cámara de ionización con un electreto. Un electreto es una pieza de material dieléctrico que exhibe una carga eléctrica cuasi permanente. Para la medición de radón el electreto está confinado en una cámara de plástico conductor (véase la Figura 2.29). El radón que se difunde en la cámara causa la ionización de la cámara a medida que el radón decae y los iones generados por los productos de decaimiento del radón, son recogidos por el electreto cargado. La reducción de carga en el electreto es proporcional a la concentración del radón ingresado.



Figura 2.29: Electets E-perm S. Extraído de «Radon Supplies». Recuperado de <https://www.radonsupplies.com>.

En la Tabla 2.9 se realiza un cuadro resumen de los métodos de medición de radón aerotransportado.

Tabla 2.9: Métodos para radón aerotransportado.

Categoría de muestreo	Método/instrumento	Principio de medición	Notas
Toma de muestra	Celda de centelleo	Conteo de centelleo alfa	Bajo costo en uso de campo
Toma de muestras/continuo	Cámara de ionización	Conteo de corriente	Adecuado para uso en campo
Toma de muestra	Centellador liquido	Conteo de centelleo liquido	Muestras colectadas en bolsas para muestras en gas son burbujeadas a través de solución centelladora
Continuo	Monitor de celda de centelleo de flujo continuo	Conteo centelleo alfa	Radón pasa continuamente a través de la celda
Continuo	Monitor electrostático de difusión pasiva	Po-218 colectado electrostáticamente en detector de centelleo	-
Continuo	Monitor de difusión de radón	Productos de decaimiento de radón removidos por electreto, conteo de centelleos alfa	-
Integrado	Detector de pistas alfa	Partículas alfa dañan película sensible, en la cual estas son contadas	Más comúnmente usado con una duración de 1 a 12 meses
Integrado	Monitor de carbón activado	Adsorción de radón en carbón activado, análisis por conteo gamma	Dispositivo de mediciones de periodos cortos (2-7 días)
Integrado	Electretes	Radón difundido en una cámara donde ocurre la ionización, los iones son colectados por un electreto cargado, cambio en la carga de electreto	Disponibilidad para periodos cortos y largos

Fuente: (Nagda, 1994).

2.4 REGLAMENTACIÓN RADIOLÓGICA CONCERNIENTE AL RADÓN (Rn²²²) EN AIRE.

Dado que el radón está presente de forma natural en el medio ambiente y que, al mismo tiempo es un cancerígeno humano para el cual no existe un nivel de riesgo cero, el establecimiento de niveles de acción a partir de los cuales tomar medidas correctoras es complejo y dificultoso. Como resultado de ello, los valores existentes en distintos países son consecuencia de su problemática particular, sus posibilidades y de la sensibilidad pública existente. Para los edificios de nueva construcción la tendencia general es recomendar el seguimiento de códigos o prácticas de construcción, adaptadas a las características de cada lugar, que limiten el nivel de radón. En El Salvador la legislación vigente para la emisión y mediciones de parámetros para este tipo de contaminación atmosférica en espacios cerrados en gas radón (Rn²²²), están limitadas solamente a los niveles indicados en el Reglamento Especial de Protección y Seguridad Radiológica de El Salvador.

En 1990 la Comisión de la Comunidad Europea, basándose en un informe presentado en 1987 por un grupo de trabajo de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) recomienda limitar la concentración media anual de gas radón a 400 Bq/m³ en edificios ya existentes y a 200 Bq/m³ en las nuevas construcciones.

En Estados Unidos, la EPA recomendó en 1987 tomar los 150 Bq/m³ como el valor a partir del cual deben realizarse una serie de intervenciones graduales, estableciendo los períodos en que debe lograrse su reducción (años, meses o semanas).

La OMS estableció en 1987 su recomendación teniendo en cuenta la exposición a productos descendientes de radón, expresada como concentración equivalente de radón (EER), y proponiendo 100 Bq/m³ EER de promedio anual como valor a reducir

y 400 Bq/m³ EER para una actuación inmediata. Las construcciones nuevas no deben superar los 100 Bq/m³ EER.

La ICRP adoptó en 1993 una nueva recomendación en la que propone, para los edificios existentes con concentraciones entre 200 y 600 Bq/m³, actuaciones en función del nivel de concentración. En este mismo documento también se proponen niveles de referencia para puestos de trabajo en los que existe poca ocupación, por ejemplo, oficinas, bibliotecas y teatros. Se proponen valores entre 500 Bq/m³ y 1500 Bq/m³. Estos valores difieren de los establecidos para residencias, ya que como es habitual, se ha considerado que en el ámbito laboral el tiempo de exposición es más corto y se asume una sensibilidad diferente frente a la radiación entre la población general y la trabajadora, en la Tabla 2.10 se realiza un resumen de la reglamentación existente concerniente al radón.

Tabla 2.10: Resumen de reglamentación radiológica sobre el radón (Rn²²²).

Institución	Año	Niveles
EPA	1987	a) 150 Bq/m ³ como el valor a partir del cual deben realizarse una serie de intervenciones graduales.
Comisión de la Comunidad Europea	1990	a) Concentración media anual de gas radón a 400 Bq/m ³ en edificios ya existentes. b) 200 Bq/m ³ en las nuevas construcciones.

Continua...

Tabla 2.10: Resumen de reglamentación radiológica sobre el radón (Rn²²²) (Continuación).

Institución	Año	Niveles
OMS	1987	a) 100 Bq/m ³ EER de promedio anual como valor a reducir. b) 400 Bq/m ³ EER para una actuación inmediata. c) Las construcciones nuevas no deben superar los 100 Bq/m ³ EER.
ICRP	1993	a) Edificios existentes con concentraciones entre 200 y 600 Bq/m ³ . b) Para puestos de trabajo en los que existe poca ocupación, por ejemplo, oficinas, bibliotecas y teatros. Se proponen valores entre 500 Bq/m ³ y 1500 Bq/m ³

2.4.1 Reglamento Especial de Protección y Seguridad Radiológica de El Salvador.

En El Salvador la legislación para la emisión y mediciones de parámetros para este tipo de contaminación atmosférica en espacios cerrados en gas radón (Rn²²²), están limitadas solamente al Reglamento Especial de Protección y Seguridad Radiológica de El Salvador, bajo la tutela de la Dirección de Protección Radiológica (DPR) del Ministerio de Salud.

En el Art. 150 del presente reglamento se expresa lo siguiente:

2.4.1.1 Exposición del público debida al radón doméstico.

Art. 150.- Cuando sea necesario evaluar la exposición debida al radón doméstico en viviendas, la Autoridad Reguladora establecerá el nivel de referencia, el cual se fijará en un valor que no supere un promedio anual de concentración de actividad de 300 Bq/m³ (DPR, 2018)

Para lugares de trabajos, como en edificios estatales, hospitales, etc., se considera los siguientes límites:

2.4.1.2 Exposición del público debida al radón en los lugares de trabajo.

Art. 153.- Cuando sea necesario evaluar la exposición ocupacional debida al radón en los lugares de trabajo, la Autoridad Reguladora establecerá el nivel de referencia del Rn²²², el cual se fijará en un valor que no supere un promedio anual de concentración de la actividad del Rn²²² de 1000 Bq/m³, teniendo en cuenta las circunstancias sociales y económicas existentes (DPR, 2018).

En la Tabla 2.11 se realiza un resumen de los niveles máximos de concentraciones de gas radón a los que pueden estar expuestas las personas en lugares cerrados en El Salvador según el Reglamento Especial de Protección y Seguridad Radiológica.

Tabla 2.11: Reglamentación Radiológica sobre el radón en El Salvador.

Institución	Año	Niveles
DPR	2018	300 Bq/m ³ como el nivel de referencia de concentraciones de actividad de radón en viviendas.
DPR	2018	1000 Bq/m ³ como el nivel de referencia de concentraciones de actividad de radón en lugares de trabajo.

2.5 EVALUACION DE MÉTODOS ANALÍTICOS.

En la evaluación de una metodología es necesario tener en cuenta como base el contexto y conocimiento sobre la validación de un método analítico.

La validación de un método analítico es un paso fundamental para asegurar que los resultados entregados por dicho método son confiables. Cuando se realiza la validación de un método, lo que se busca es poder determinar con fundamento estadístico que el método es adecuado para los fines previstos. De manera que, la validación se efectúe en forma metódica, ordenada y confiable. En general, se establece que se debe validar (ISP, 2010).

- a) Métodos no normalizados: Corresponden a métodos nuevos (ejemplo: publicado en revista científica), o bien, a métodos que tradicionalmente se han usado, pero que no están normalizados que requieren de una precisión y exactitud confiable.
- b) Método normalizado con una modificación significativa.

El objetivo de la validación y la verificación, es demostrar que el método utilizado es adecuado para la aplicación en la que se propone utilizar, así, como también demostrar que las modificaciones que pudieron haberse realizado no afectan su desempeño, ni la confiabilidad de los resultados por este entregado.

2.5.1 Algunos parámetros útiles para la evaluación de una metodología analítica.

2.5.1.1 Linealidad.

La linealidad se define como la habilidad del método analítico para obtener resultados de la prueba proporcionales a la concentración del analito (Eurachem, 2005). Con el fin de determinar el rango lineal se puede realizar mediante un gráfico de concentración versus respuesta, que se conoce como función respuesta (normalmente llamada recta de calibrado). Ésta se establece con una cierta cantidad de valores formados por un blanco y los patrones de trabajo limpios de valor teórico conocido, que cubran el intervalo de trabajo. En este sentido se recomienda abarcar valores desde cercano al cero y valores superiores al valor de interés. El número de puntos a analizar deberá ser establecido por el analista.

Luego de realizar el gráfico se puede observar el comportamiento de la curva y establecer cualitativamente el rango lineal. Después de establecer el comportamiento lineal del método se deberá realizar la curva de trabajo o curva de calibración como se observa en la Figura 2.30. Graficar los datos de concentración de los estándares de calibración estimados (X) versus la lectura observada (Y).

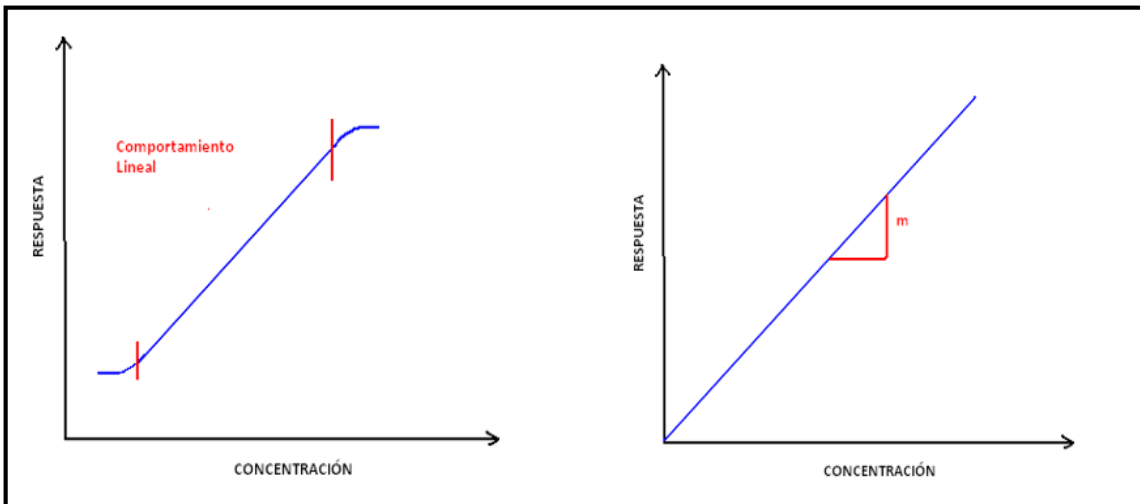


Figura 2.30: Rango lineal en la curva y establecimiento de la curva de calibración.
Fuente: (ISP, 2010).

Evaluar los estimadores de regresión lineal del gráfico: la pendiente (m), el coeficiente de correlación (r) y el punto de corte (intercepto) con el eje de las Y (L_0).

$$Y = X \cdot m + L_0 \quad \text{Ec. 2.5}$$

En general el criterio de aceptación cualitativo que se usa para determinar la linealidad es el coeficiente de correlación: en la práctica si el coeficiente de correlación (r) tiene un valor cercano a uno, esto significa que existe correlación con una probabilidad elevada. Para una curva de calibración o trabajo, es recomendable que el coeficiente de correlación obtenido sea mayor o igual a 0.999.

2.5.1.2 Límites.

Cuando las mediciones se realizan a concentraciones bajas, existen tres conceptos generales a considerar. En primer lugar, puede ser necesario establecer un valor de resultado que es considerado un nivel de analito significativamente diferente de ce-

ro. Regularmente, alguna acción es requerida a este nivel, tal como declarar un material contaminado. Este nivel es conocido como “valor crítico”, “límite de decisión”. En segundo lugar, es importante conocer la concentración más baja del analito que puede ser detectada por el método a un nivel de confianza especificado. Es decir, ¿a qué concentración real se excederá con seguridad el valor crítico descrito anteriormente? Los términos como “límite de detección” (*LOD*), el cual es definido por Eurachem (2005) como el menor contenido que puede medirse con una certeza estadística razonable o como la menor concentración del analito en una muestra que puede detectarse, pero no necesariamente cuantificarse bajo las condiciones establecidas de la prueba, son utilizados para este concepto. En tercer lugar, es adicionalmente importante establecer la menor concentración de un analito que puede determinarse con una precisión y una exactitud aceptable bajo las condiciones establecidas de la prueba (Eurachem, 2005). Este tercer concepto usualmente es referido como el límite de cuantificación (*LOQ*). En validación de métodos, comúnmente se determinan el *LOD* y el *LOQ* (OSA, 2017).

También es necesario distinguir entre el límite de detección del instrumento y el límite de detección del método. El límite de detección del instrumento puede basarse en el análisis de una muestra, usualmente un blanco de reactivo, sometido directamente al instrumento (es decir, omitiendo cualquier paso de preparación de muestra), o en la relación señal/ruido en p.ej. un cromatograma. Para obtener el límite de detección de un método, el *LOD* debe basarse en el análisis de muestras que hayan sido sometidas a todo el proceso de medición obteniendo resultados calculados con la misma ecuación que para las muestras de ensayo. El dato más útil para la validación del método es el límite de detección del método. Estos parámetros se relacionan con la cantidad de analito requerida para dar un resultado significativo, cualitativo o cuantitativo. Según un resultado "positivo" no es suficiente para que el analista considere detectado un analito. Se precisa además, conocer el límite de detección en las condiciones del método; de lo contrario se puede incurrir en un falso positivo: suponer el analito presente en la muestra cuando de hecho no lo está.

El límite de cuantificación es un término cuantitativo (menor cantidad medible) mientras que el límite de detección es cualitativo (menor cantidad detectable). Numéricamente es mayor el límite de cuantificación y representa la menor cantidad de analito que puede analizarse con un % de Coeficiente de Variación y de Recuperación aceptables. Concentraciones menores pueden detectarse, pero no cuantificarse.

2.5.1.3 Exactitud.

El manual del Codex Alimentarius define la exactitud como el grado de concordancia entre el resultado de un ensayo y el valor de referencia.

El término “exactitud”, está aplicado a un conjunto de resultados de un ensayo, y supone una combinación de componentes aleatorios y un componente común de error sistemático o sesgo. Cuando se aplica a un método de ensayo, el término “exactitud” se refiere a una combinación de veracidad y precisión.

- A) Veracidad: Determina el grado de coincidencia existente entre el valor medio obtenido de una serie de resultados y un valor de referencia aceptado.

La veracidad puede ser determinada por sesgo o recuperación.

- I. Sesgo (s): La diferencia entre la expectativa relativa a los resultados de un ensayo o una medición y el valor verdadero. En la práctica el valor convencional de cantidad puede sustituir el valor verdadero. El sesgo es el error sistemático total en contraposición al error aleatorio.

Para determinar el sesgo puede utilizarse material de referencia, material fortificado, material control, material ensayo de aptitud: Para este fin, se debe medir un analito de concentración conocido y se determina la diferencia en valor absoluto entre el valor conocido y la media del valor obtenido. Una diferencia sistemática importante en relación al valor de referencia aceptado se refleja en un mayor valor del sesgo, cuanto más pequeño es el sesgo, mayor veracidad indica el método. Por medio de la Ecuación 2.6 se tiene:

$$s = X - X_a \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde:

s = sesgo

X = lectura obtenida o valor promedio de las lecturas obtenidas.

X_a = valor asignado, valor certificado del material de referencia o valor esperado.

- II. Recuperación (R): Es la fracción de la sustancia agregada a la muestra (muestra fortificada) antes del análisis, al ser analizadas muestras fortificadas y sin fortificar.

La recuperación permite ver el rendimiento de un método analítico en cuanto al proceso de extracción y la cantidad del analito existente en la muestra original. Por lo cual, la recuperación está intrínsecamente relacionada a las características de la matriz de la muestra.

Se recomienda realizar a lo menos 6 mediciones de cada uno en lo posible en tres niveles. Se debe considerar al elegir estos niveles el rango de la curva de calibración del método, el LOD y el LMP establecido. De manera que los niveles seleccionados

permitan entregar la mejor información posible respecto a la capacidad de recuperación del método, en cuanto a estos valores críticos (ISP, 2010).

Se calcula de la siguiente manera:

$$R = \frac{C_e - C_o}{C_a} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Siendo:

R = Recuperación

C_e = es la concentración de analito de la muestra enriquecida.

C_o = es la concentración de analito medida en la muestra sin adicionar.

C_a = es la concentración de analito adicionado a la muestra enriquecida.

Se puede igualmente expresar en porcentaje de recuperación (%R): se calcula de la siguiente manera:

$$\%R = [R] \times 100 \quad \text{Ec. 2.8}$$

- B) Precisión: La precisión podrá establecerse en términos de Repetibilidad y Reproducibilidad. El grado de precisión se expresa habitualmente en términos de imprecisión y se calcula como desviación estándar de (ONUAA, 2018)
- I. Repetibilidad: Es la precisión bajo las condiciones de repetibilidad, es decir, condiciones donde los resultados de análisis independientes se obtienen con el mismo método en ítems de análisis idénticos en el mismo laboratorio por el mismo operador utilizando el mismo equipamiento dentro de intervalos cortos de tiempo.

Se puede determinar registrando a lo menos 6 mediciones bajo las mismas condiciones (mismo operador, mismo aparato, mismo laboratorio y en corto intervalo de tiempo) de un analito en un material de referencia. Calcular la desviación estándar (S_r) y el porcentaje de coeficiente de variación ($CV_r\%$) (ISP, 2010).

- II. Reproducibilidad: Es la precisión bajo las condiciones de reproducibilidad, es decir, condiciones donde los resultados de los análisis se obtienen con el mismo método en ítem idénticos de análisis en condiciones diferentes ya sea de laboratorio, diferentes operadores, usando distintos equipos, entre otros.

2.5.1.4 Robustez.

La robustez de un procedimiento analítico es una medida de su capacidad para permanecer inalterado por pequeñas variaciones premeditadas de los parámetros del método (Eurachem, 2005). En este sentido el objetivo de la prueba de robustez es optimizar el método analítico desarrollado o implementado por el laboratorio, y describir bajo qué condiciones analíticas (incluidas sus tolerancias), se pueden obtener a través de estos resultados confiables (AEFI, 2001). Un método de ensayo es más robusto entre menos se vean afectados sus resultados frente a una modificación de las condiciones analíticas (analistas, equipos, reactivos, pH, temperatura, tiempo de reacción, estabilidad de la muestra y otros).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.

En este capítulo se presentan los pasos a seguir para el cumplimiento de los objetivos de la investigación; inicialmente se describe el tipo y área de estudio, posteriormente se enumeran los métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos para desarrollar la parte documental-descriptiva; además se presenta la metodología para la búsqueda, análisis y síntesis bibliográfica que ayude a depurar de entre los estudios relacionados al gas radón en aire, aquellos que tengan relevancia, aplicabilidad y funcionalidad para la investigación; finalmente se comparan las metodologías competentes en función del tipo de detector, sistema de muestreo y tiempos de muestreo.

3.1 TIPO DE ESTUDIO.

El tipo de investigación a realizar es de **tipo de desarrollo**. El nivel de investigación será **exploratorio** en una primera fase, para la caracterización de la metodología a ajustar y luego **explicativa** para poder plantear una metodología para la estimación de radón.

3.2 ÁREA DE ESTUDIO.

El área de estudio es el **área de ingeniería y tecnología con enfoque en trazadores radiactivos naturales para estudios medioambientales y por sus efectos a la salud humana**, para el ajuste y propuesta de una metodología para la medición de radón (Rn^{222}) exhalado.

3.3 MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.

Los métodos de investigación que se aplican son: en una primera parte documental-descriptiva, pues se establece una metodología para la estimación de gas radón en aire a través de documentación, comparación y análisis bibliográfico; tomando en cuenta el tipo del detector, procedimiento de muestreo, calibración del método y técnica de medición de las concentraciones de radón; y en una segunda parte es de tipo científico-experimental ya que se obtienen datos de algunas pruebas realizadas por los asesores del CIAN-FIA-UES. En la Tabla 3.1 se presenta una síntesis de las metodologías, técnicas e instrumentos aplicados en esta investigación.

Tabla 3.1: Síntesis de metodologías, técnicas e instrumentos para la investigación.

Objetivo específico	Estrategia/Herramienta/ Metodología de obtención	Técnicas	Instrumentos
Objetivo 1 Proponer la metodología para la estimación de las concentraciones de gas radón en aire utilizando detectores de adsorción de carbón activado, adaptando su aplicación en recintos cerrados y en estudios de suelo.	Recolección de información de las metodologías existentes para la estimación de concentraciones de radón en aire utilizando detectores de adsorción de carbón activado.	Análisis documental.	Tesis y tesinas.
		Fuentes documentales	Revistas científicas.
		Fuentes digitales.	Informes técnicos.
		Fuentes bibliográficas.	Informes de investigación de instituciones públicas y privadas. Libros o artículos que interpretan otros trabajos de investigación.

Continua...

Tabla 3.1: Síntesis de metodologías, técnicas e instrumentos para la investigación (Continuación).

Objetivo específico	Estrategia/Herramienta/ Metodología de obtención	Técnicas	Instrumentos
<p>Objetivo 2 Sistematizar el procedimiento metodológico para la determinación cuantitativa del coeficiente de adsorción del gas radón en carbón activado, para aplicarlo como criterio de selección y manejo en procesos de adsorción del gas radón en aire y su posterior medición.</p>	<p>Recopilación de información de la metodología para determinar el coeficiente de adsorción de gas radón en carbón activado.</p>	Fuentes documentales.	<p>Informes técnicos. Informes de investigación de instituciones públicas y privadas.</p>
		Fuentes digitales.	<p>Informes técnicos. Informes de investigación de instituciones públicas y privadas.</p>
		Flujogramas.	
<p>Objetivo 3 Proponer el diseño del sistema de muestreo del gas radón en aire, basado en el uso de detectores de carbón activado para su aplicación en espacios cerrados y estudios ambientales.</p>	<p>Desarrollar un procedimiento para el muestreo de gas radón en aire.</p>	<p>Cuadros comparativos. Flujogramas.</p>	<p>Guías de procedimientos. Tesis. Informes técnicos.</p>

Continúa...

Tabla 3.1: Síntesis de metodologías, técnicas e instrumentos para la investigación (Continuación).

Objetivo específico	Estrategia/Herramienta /metodología de obtención	Técnicas	Instrumentos
<p>Objetivo 4 Diseñar el protocolo de evaluación del método analítico propuesto, a través de parámetros estadísticos que genere la fiabilidad del método en este tipo de aplicaciones.</p>	<p>Protocolo para determinar el radón adsorbido en el detector de carbón activado.</p>	<p>Diagramas de flujo. Protocolos.</p>	<p>Tesis. Tesinas. Revistas científicas. Informes técnicos. Informes de investigación de instituciones públicas y privadas. Libros o artículos que interpretan otros trabajos de investigación. Software informático.</p>
	<p>Algoritmos para el procesamiento y análisis de parámetros estadísticos.</p>	<p>Algoritmos.</p>	

3.4 METODOLOGÍA.

La metodología empleada para la puesta en marcha de la investigación está compuesta por diversos pasos reunidos en etapas, en la Figura 3.1 se presentan, mediante un diagrama de procesos, las etapas y la secuencia a seguir del proyecto.

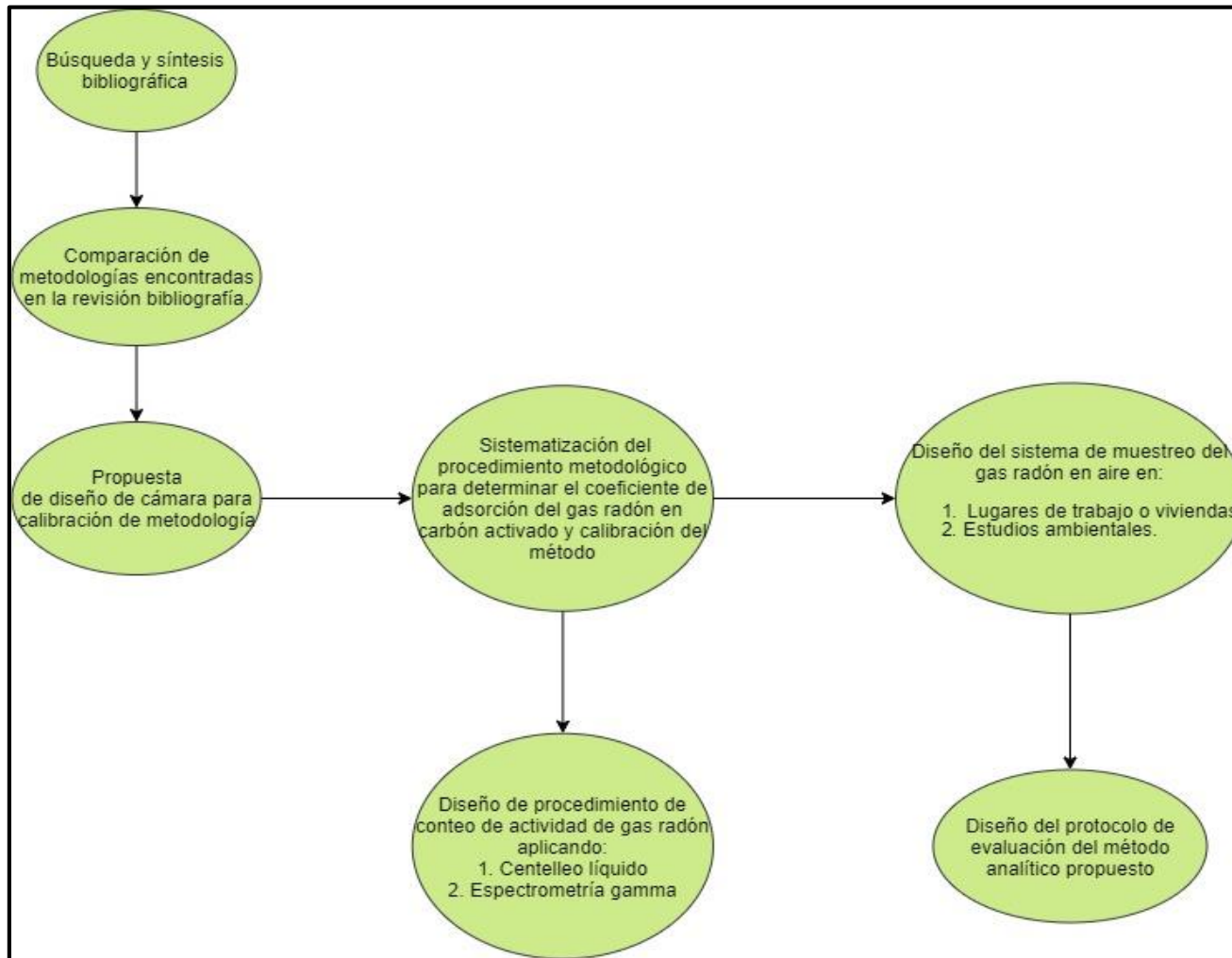


Figura 3.1: Diagrama de bloques de la metodología a seguir.

3.5 BÚSQUEDA Y SÍNTESIS BIBLIOGRÁFICA.

La búsqueda bibliográfica se inició con las investigaciones publicadas por Canoba y López, se lograron encontrar de estos autores tres estudios los cuales proporcionaban información precisa y detallada tanto del fenómeno de adsorción de radón en carbón activado, de la metodología para determinar radón por adsorción en carbón activado y medición por centelleo líquido y de los resultados obtenidos en las mediciones de radón en el interior de viviendas de la República Argentina derivados de la puesta en marcha de la metodología; seguidamente para poder desarrollar los enfoques (estudios ambientales y mediciones en interiores) de la metodología, se realizó la búsqueda de métodos para medir concentraciones de gas radón en aire en interiores y exteriores mediante la adsorción en detectores de carbón activado, se encontraron alrededor de cinco tesis, tesinas o artículos científicos de los cuales se descartaron tres en base a criterios de aplicabilidad o disposición de instrumentos o equipos con los cuales cuenta el CIAN-FIA-UES, en la Figuras 3.2 y 3.3 se esquematiza el proceso hecho del análisis bibliográfico.

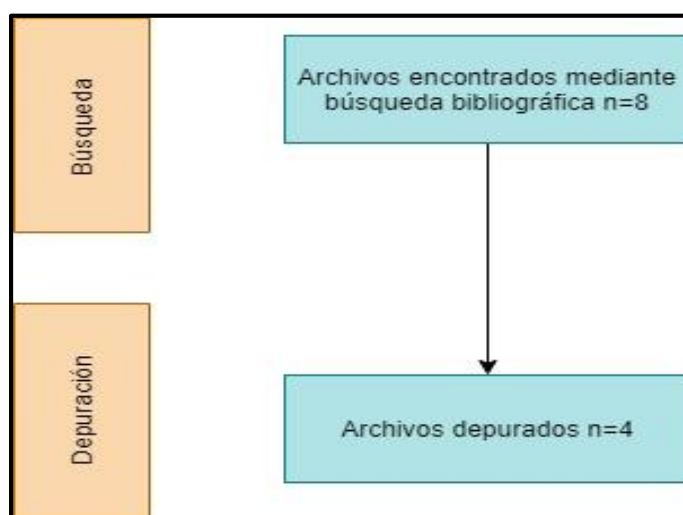


Figura 3.2: Esquema del proceso de búsqueda y depuración bibliográfica.

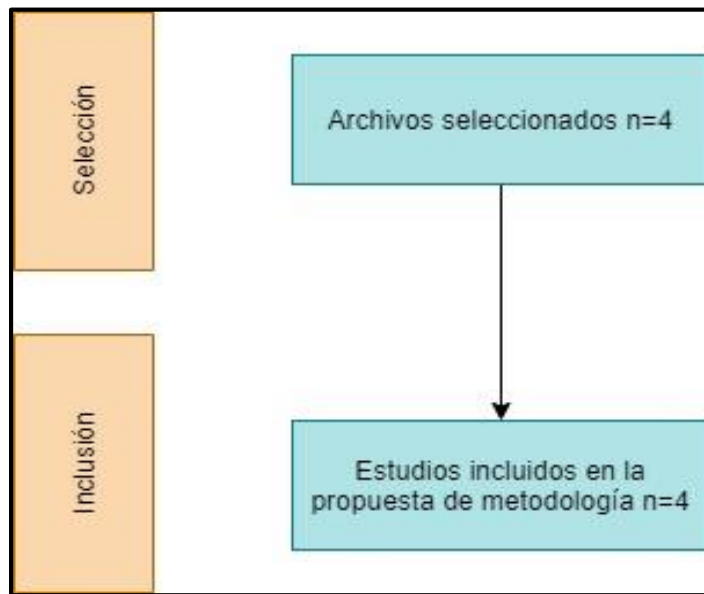


Figura 3.3: Esquema del proceso de selección e inclusión bibliográfica.

En los estudios seleccionados los métodos empleados permiten monitorear concentraciones de radón en aire con características y ventajas en cuanto a períodos de medición e instrumentos utilizados, estas investigaciones se citan a continuación en la Figura 3.4.

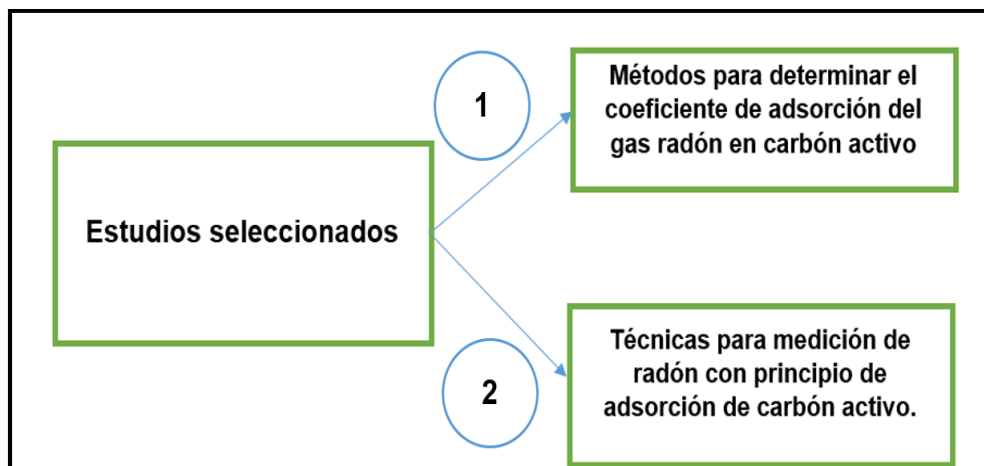


Figura 3.4: Clasificación y cantidad de estudios seleccionados.

3.6 TÉCNICAS SELECCIONADAS DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA PARA MEDICIÓN DE RADÓN (Rn^{222}), QUE SERVIRÁN PARA DESARROLLAR Y DISEÑAR LA PROPUESTA METODOLÓGICA.

Para la elaboración de la propuesta de metodología, se tomaron en consideración diversas técnicas y metodologías. Al finalizar el proceso de análisis bibliográfico se seleccionaron las metodologías que se ajustaban a los objetivos del presente trabajo de investigación. Los criterios de selección se basaron en:

- a) Instrumentación y equipos disponibles en el laboratorio del CIAN-FIA-UES, que pudieran adaptarse o utilizarse para la medición de la exhalación de gas radón (Rn^{222}) en aire, así como el costo en caso de nueva adquisición.
- b) Posibilidad de medir la actividad de radón exhalado por la fuente de emanación.
- c) Si la técnica requería de un detector activo o pasivo, y si medían directamente la concentración de radón (Rn^{222}), o si ésta se obtenía a través de la medición de sus descendientes.
- d) Lectura directa de las concentraciones de radón (Rn^{222}) o si requerían de un soporte externo para la obtención de los resultados.
- e) Rango de medición, es decir, si se utilizaba en exteriores, interiores o en ambos entornos.
- f) Si su transporte era fácil y sencillo para mediciones de campo.

En las secciones siguientes se describen brevemente dos metodologías las cuales son igual de competentes para la formulación de la propuesta de metodología que se plantea en el Capítulo 4.

3.6.1 Técnica de cánister de carbón activado medido con un detector de centelleo de yoduro sódico.

Esta técnica se basa en la Guía de la EPA 520/5-8-87-005, en donde los cánister de carbón activado se utilizan para medir la concentración de gas radón en el aire, en viviendas o espacios abiertos. Estos dispositivos tienen un diámetro de 75 mm y una altura de 30 mm con 50 g de carbón activado en su interior (véase la Figura 3.5). La captación de radón se basa en la adsorción pasiva del mismo en la superficie de los gránulos de carbón. En esta técnica el cánister se cubre con un recipiente de alta densidad no permeable al radón de diámetro 12 cm y 10 cm de altura (véase la Figura 3.6), para conseguir la acumulación en su interior durante el período de medición. Para mayor comprensión del sistema en la Figura 3.7 se presenta un esquema del mismo.



Figura 3.5: Cánister de carbón activado. Fuente: (Noverques Medina, 2017).



Figura 3.6: Recipiente impermeable al radón. Fuente: (Noverques Medina, 2017).

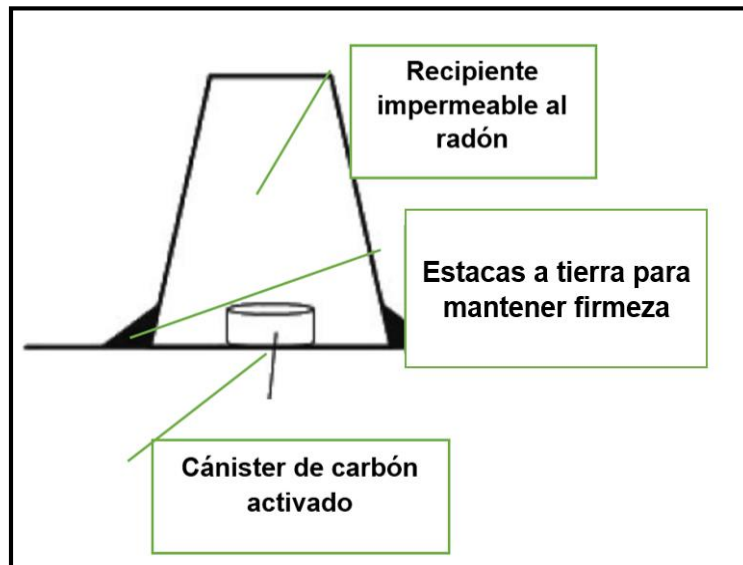


Figura 3.7: Sistema cánister-recipiente impermeable. Fuente: (Hang et al., 2008).

Luego de la medición el cánister se analiza por espectrometría gamma, mediante un detector de centelleo.

La técnica de espectrometría gamma consiste en la obtención del espectro de las radiaciones gamma emitidas por una muestra, esta técnica se basa en que la respuesta del detector es proporcional a la energía de los rayos gamma detectados, de forma que se obtiene la distribución energética o espectro en energía.

El detector de centelleo está formado por una sustancia luminiscente, capaz de absorber la energía de la radiación y emitirla en forma de fotones y un fotomultiplicador, que transforma la señal luminosa en una señal eléctrica. El esquema del detector se muestra en la Figura 3.8.

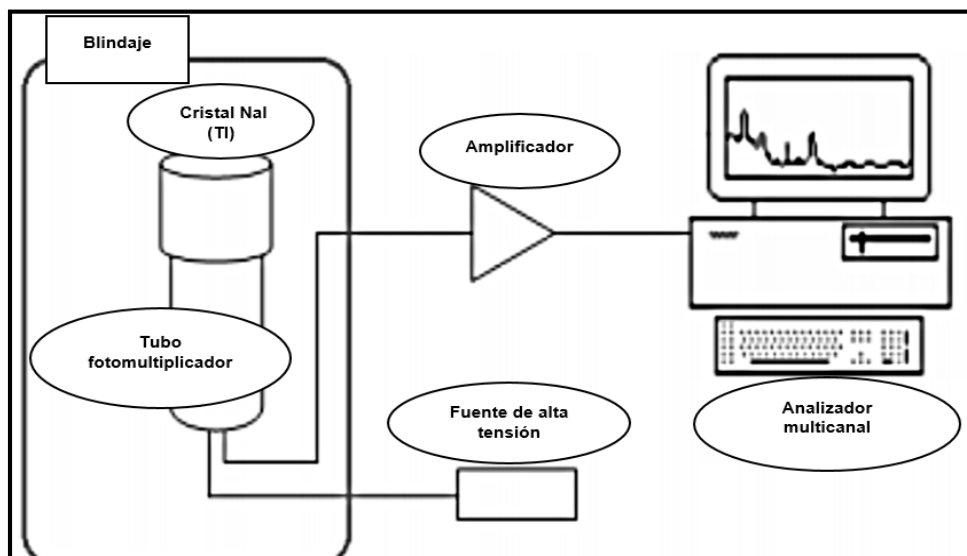


Figura 3.8: Esquema del detector de centelleo. Fuente: (Noverques Medina, 2017).

La concentración de gas radón se determina a partir de sus descendientes, el Pb^{214} y el Bi^{214} , cuyos picos gammas a 242, 294,352 y 609 KeV se obtienen colocando el recipiente sellado encima del detector de NaI. El espectro que se lee en el analizador multicanal se puede observar en la Figura 3.9.

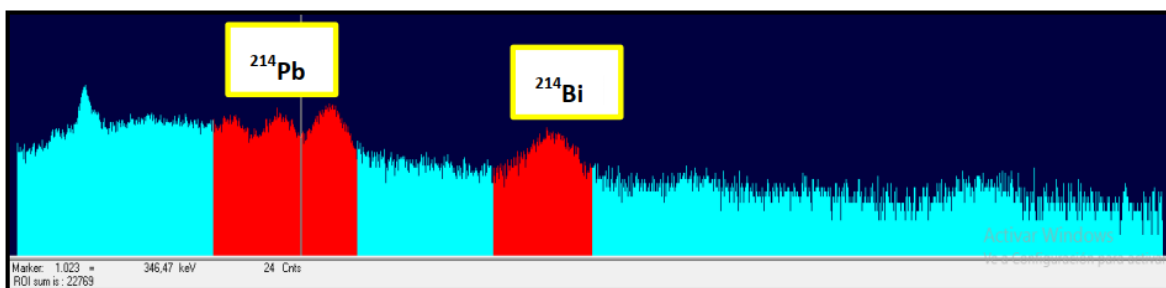


Figura 3.9: Espectro gamma del Pb^{214} y el Bi^{214} . Fuente: (Noverques Medina, 2017).

Noverques Medina (2017) aplicó el método para realizar mediciones de radón en la ciudad de Peñíscola, ciudad que se encuentra situada en la costa norte de la provincia de Castellón, en la comarca del Baix Maestrat, España, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Resultados obtenidos en la medición de radón en la ciudad de Peñíscola, mediante el cánister de carbón activo.

Mediciones en la ciudad de Peñíscola, provincia de Castellón, en la comarca del Baix Maestrat, España		
Fecha de medición	Cuentas Netas (N)	Concentración (Bq/m ³)
06/09/2016	2607	471.1258 ± 26.0211
07/09/2016	1389	207.8541 ± 20.5959

Fuente: (Noverques Medina, 2017).

3.6.2 Método ARN-PI14/98 para determinar radón (Rn²²²) en carbón activado y medición por centelleo líquido.

Es un método pasivo propuesto por la Autoridad Regulatoria Nuclear de Argentina por medio del estudio de sus colaboradores Canoba y López (1998), para la determinación de la concentración de radón gaseoso. El sistema detector consiste en un vial de centelleo que contiene 2 g de carbón activado, 1 cm de barrera difusa de espuma de poliuretano y 4 g de silica gel (véase la Figura 3.10).

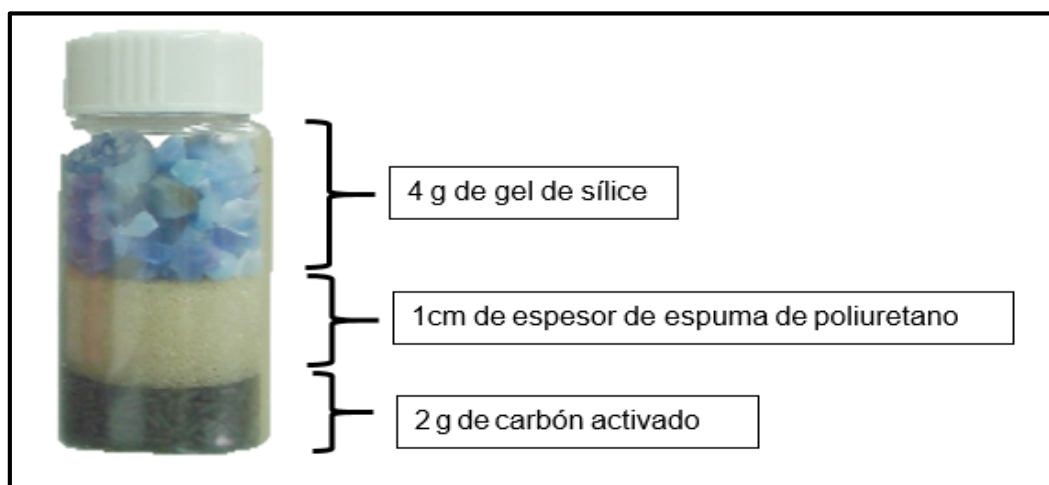


Figura 3.10: Configuración de capas del dispositivo de muestreo de radón. Fuente: (Canoba y López, 1998).

Previamente el sistema debe de ser calibrado, para la elaboración de la curva de calibración para diferentes valores de humedad y si se tienen lotes distintos de carbón activado, esta curva proporciona datos que posteriormente serán utilizados en los cálculos de la concentración de radón (Rn^{222}). La calibración del método se lleva a cabo utilizando una cámara de referencia de un metro cúbico de volumen con cierres herméticos, que consta de una antecámara a través de la cual se introducen los dispositivos a calibrar construida en acrílico, la cual contiene en su interior mineral de uranio, como fuente de emanación de gas radón. La temperatura, la humedad y la concentración de radón en el interior de la cámara son controladas y monitoreadas en forma continua (véase la Figura 3.11).

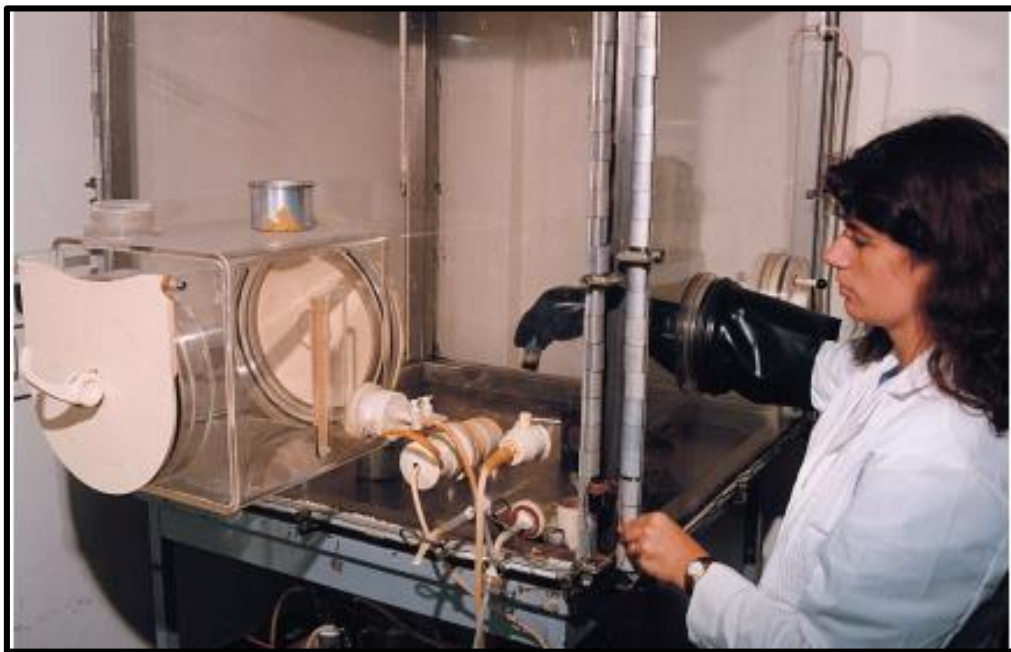


Figura 3.11: Cámara de referencia para la calibración de detectores de radón en aire. Fuente: (ARN, 1999).

Posteriormente el muestreo consiste en exponer el vial abierto en el lugar a ser monitoreado, durante un tiempo determinado, para que el radón se adsorba en el carbón activado expuesto dentro del vial. Una vez finalizado el muestreo, el radón ad-

sorbido en un lapso determinado de tiempo, se procede a sellar el vial y a realizar su medición en un equipo contador alfa-beta de centelleo líquido de bajo fondo (técnica de centelleo líquido).

En la técnica de centelleo líquido, la detección de energía, en forma de emanaciones nucleares, por soluciones orgánicas depende de una partícula cargada (las emanaciones nucleares o el producto de interacciones de emanaciones nucleares) que produce una serie de moléculas excitadas en la solución orgánica. Estas moléculas excitadas emitirán fotones o transferirán eficientemente la energía a un aceptor (soluto) que a su vez emitirá fotones. Cada molécula excitada puede emitir solo un fotón y la energía de un fotón estará dentro de un rango limitado. El número de fotones emitidos dependerá del número de moléculas excitadas producidas por la partícula de ionización (véase la Figura 3.12). Los fotones se pueden medir recogiendo los en la superficie del tubo fotomultiplicador que los convertirá en pulsos (Horrocks, 1974).

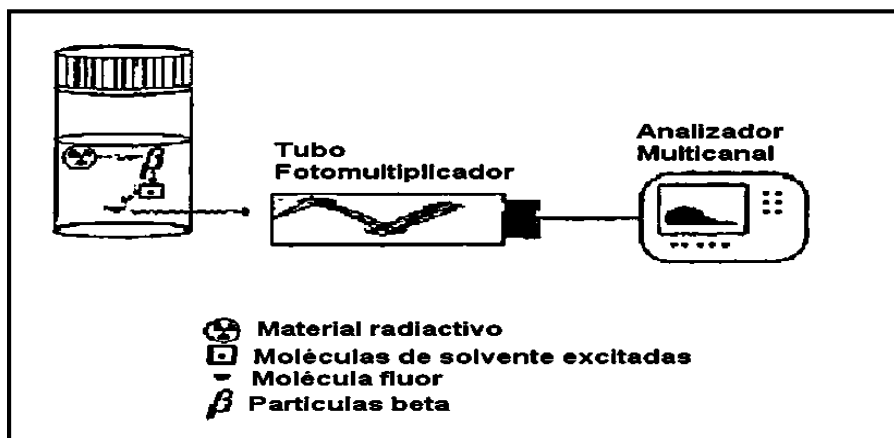


Figura 3.12: Proceso de adsorción de fotones en un medio líquido orgánico y detección en un equipo de centelleo. Fuente: (Flores y Reyes, 2004).

El conteo por centelleo líquido (RCL) es el método más sensible para medir el radón, y también el más utilizado. La popularidad del centelleo líquido para el análisis del radón se debe a varios factores, como la excelente exactitud y precisión del método,

el bajo umbral de detección, la reducida necesidad de preparación de las muestras, la capacidad para medir rápidamente un número elevado de muestras y la capacidad de cambiar de muestras sin intervención manual. (Field & Kross, 1996). A continuación, en la Figura 3.13 se presentan las partes internas de las que está compuesto un equipo de centelleo líquido.

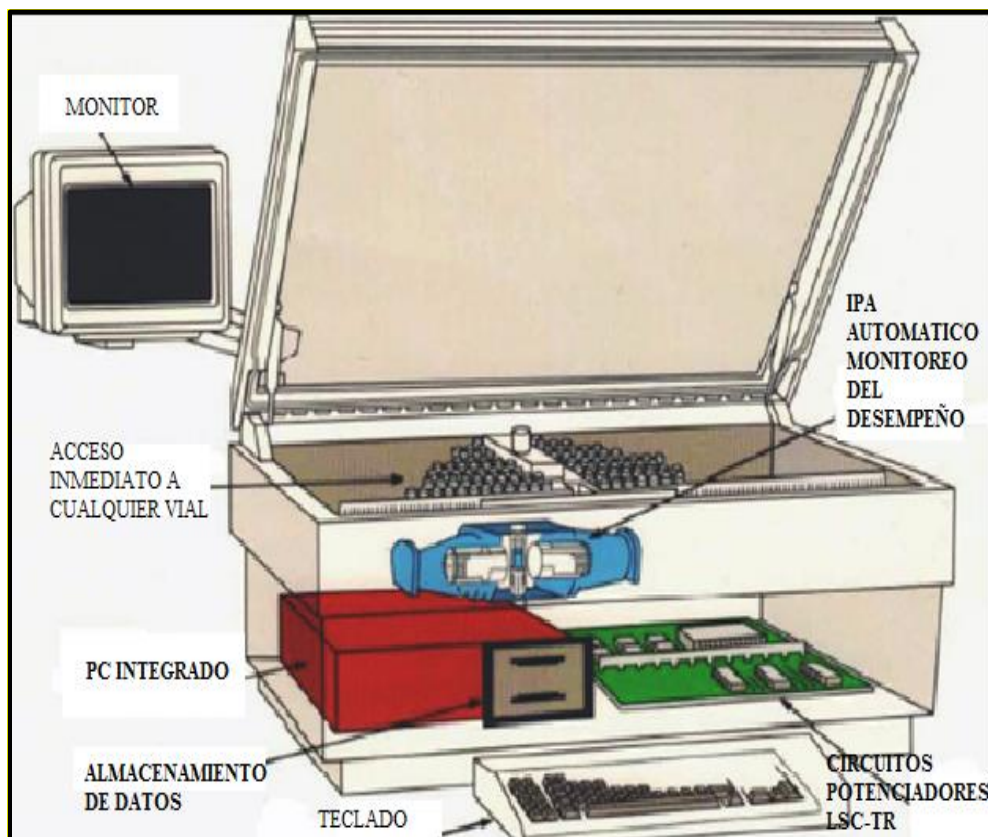


Figura 3.13: Partes internas de un equipo de centelleo líquido. Fuente: (Canoba y López, 2001).

En el año 2006 Canoba y López aplicaron el método para mediciones de radón en el interior de viviendas de la República Argentina, obteniendo las siguientes concentraciones de radón según el número de viviendas (véase la Figura 3.14).

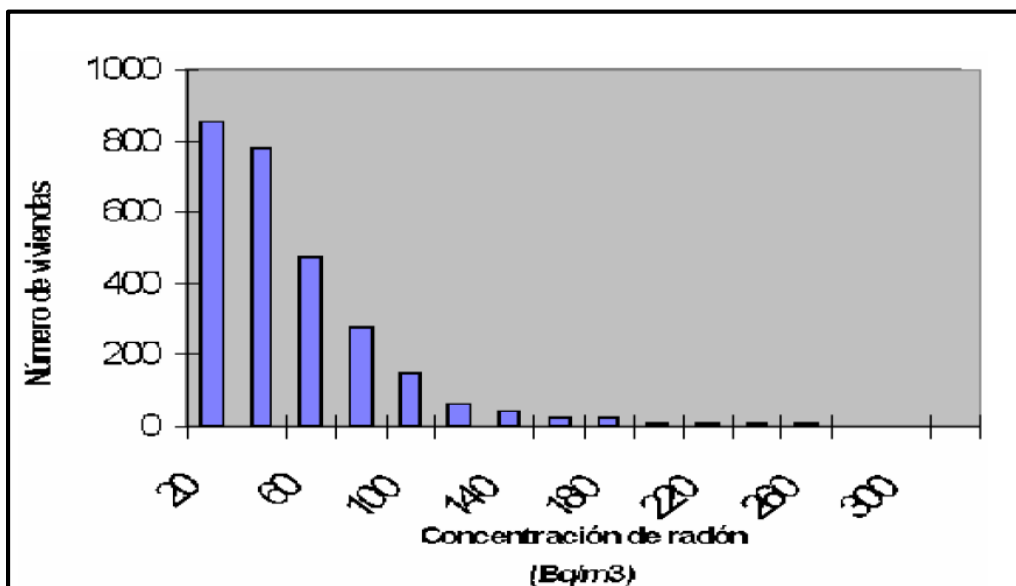


Figura 3.14: Histograma de la concentración de radón en viviendas. Fuente: (Canoba y López, 2006).

3.6.2.1 Determinación del coeficiente de adsorción del gas radón (Rn^{222}) en carbón activado.

Este método se basa en la adsorción del gas en carbón activado y la posterior medición, del decaimiento alfa-beta de los descendientes de período corto del gas radón (Rn^{222}), en un contador de centelleo líquido, una vez alcanzado el equilibrio; basándose teóricamente en el principio básico de adsorción de Van Der Waals.

Este método fue aplicado por Canoba y López en el año 2001, en un estudio teórico sobre la adsorción de gas radón en carbón activado, en donde se comprobó que la humedad es un factor de interferencia (la cantidad de vapor de agua adsorbida en el carbón activado es directamente proporcional a la humedad relativa, a temperatura constante); como se puede observar en la Figura 3.15, a mayor humedad se presenta un menor coeficiente de adsorción (k).

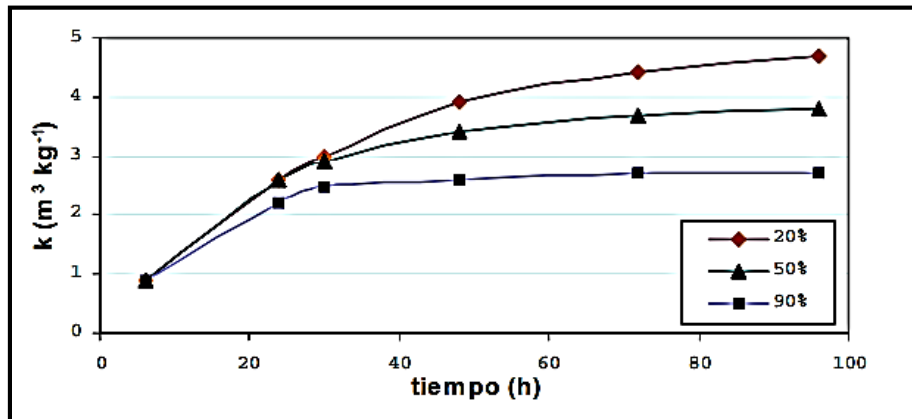


Figura 3.15: Coeficiente de adsorción en función del tiempo para diferentes valores de humedad relativa. Fuente: (Canoba y López, 2001).



3.7 COMPARACIÓN DE DETECTORES DE ADSORCIÓN DE GAS RADÓN QUE UTILIZA LA TÉCNICA DE CÁNISTER DE CARBÓN ACTIVADO Y EL MÉTODO ARN-PI 14/98.

En esta sección se comparan los detectores descritos en las técnicas seleccionadas, en base a criterios de cumplimiento, englobando las características y funcionalidades de cada detector, en el siguiente párrafo se enumeran de forma aleatoria los criterios empleados con el propósito de comparar cada alternativa.

- a) Capacidad de medir la exhalación de radón.
- b) Tipo de muestro.
- c) Tipo de detector (Medición por espectrometría gamma o centelleo líquido).
- d) Medición de la concentración directa de radón.
- e) Medición de la concentración de radón a través de sus descendientes.
- f) Rango de detección (Viviendas, edificios o exteriores)
- g) Tipo de detector (Pasivo o activo)
- h) Periodo de medición: Corto (1-3 días) o largo (más de 3 días)

Cada detector fue evaluado mediante respuesta binaria (si cumplía o no cumplía) o con respuesta específica según fue el caso, los resultados de estas evaluaciones se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Comparación de detectores de adsorción de gas radón en carbón activado.

Técnica/Detector	Criterios								
	Mide exhalación	Muestreo	Técnica de detección utilizada	Mide radón	Mide descendientes	Detecta radón en viviendas y lugares de trabajo	Detecta radón en espacios abiertos	Detector (Pasivo o Activo)	Periodo de medición
Cánister de carbón activado 	Si	Integrado	Adsorción de radón en carbón activado y medición por espectrometría gamma.	No	Si	Si	Si	Pasivo	Corto
ARN-PI 14/98/ Vial de vidrio 	Si	Integrado	Adsorción de radón en carbón activado y medición por centelleo líquido	Si	Si	Si	No	Pasivo	Corto

El primer criterio de comparación de los detectores fue la capacidad que tienen para medir las concentraciones de radón exhaladas en este caso los dos detectores lo cumplían, el segundo criterio fue en relación al muestreo en donde las dos opciones lo realizan de forma integrada principalmente para mediciones de radón en estructuras con la finalidad de evaluar riesgos a la salud a causa de la exposición, el tercer criterio es en cuanto a la técnica de detección utilizada, el primer método lo hace por espectrometría gamma y el segundo por centelleo líquido para este caso los dos métodos se pueden proponer en la metodología ya que el CIAN-FIA-UES cuenta con ambos equipos, y finalmente los siguientes criterios son similares o iguales en ambos casos, por lo que ambos detectores y por ende métodos son viables para la metodología propuesta ya que son igualmente competentes o válidos.

3.8 COMPARACIÓN DEL SISTEMA DE MUESTREO EMPLEADO EN LA TÉCNICA DE CÁNISTER DE CARBÓN ACTIVADO Y EL MÉTODO ARN PI-14/98.

Comparar los sistemas de muestreo de las metodologías elegidas ayuda a resumir las características más importantes de cada sistema permitiendo poner en contexto las ventajas de cada método; en la Tabla 3.4 se presenta una comparación en base a tiempos de exposición, equipos de medición y detector utilizado de las metodologías ARN PI-14/98 y cánister de carbón activado.

Tabla 3.4: Tabla comparativa de las características de las metodologías escogidas.

Técnica	Tiempo de exposición	Equipo de medición	Detector utilizado	Aplicabilidad
Cánister de carbón.	3 días	Espectrómetro	Cánister de carbón activado	Viviendas y espacios abiertos
ARN PI-14/98.	7 días	Equipo de centelleo líquido	Vial de vidrio	Recintos cerrados

En esta comparación el método de cánister de carbón activado presenta ventajas en cuanto a la aplicabilidad ya que se puede poner en práctica en viviendas y espacios abiertos, el tiempo de exposición de los dispositivos de muestreo es de período corto de menos de 3 días para el cánister y de 7 días para tiempos largos de exposición para el vial de carbón propuesto en la técnica del documento ARN PI-14/98, pero a pesar de lo anterior ambas metodologías se pueden modificar y acoplar para cumplir los objetivos de la investigación.

CAPITULO 4: PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIONES DE GAS RADÓN (Rn²²²), EN RECINTOS CERRADOS Y ESTUDIOS AMBIENTALES.

4.1 OBJETO.

El objetivo de esta metodología es establecer los procedimientos y protocolos para el proceso de calibración del método, el muestreo de gas radón en recintos cerrados y estudios ambientales; en donde se tenga sospecha de altas concentraciones de radón o se quieran realizar mediciones periódicas, así como también para determinar en el caso de recintos cerrados, que las personas que se encuentran en las instalaciones están expuestas a una concentración de actividad promedio anual menor a 300 Bq/m³ para viviendas y menor a 1000 Bq/m³ para los lugares de trabajo (niveles máximos establecidos por el Reglamento Especial de Protección y Seguridad Radiológica de El Salvador de la Dirección de Protección Radiológica del Ministerio de Salud en sus artículos 150 y 153).

Además de los protocolos para: la recepción de los detectores utilizados en el muestreo, la medición de la concentración de radón en el equipo de centelleo líquido y espectrometría gamma; y la disposición de residuos producto de la aplicación de la metodología.

4.2 ÁMBITO DE APLICACIÓN.

La presente metodología es aplicable a espacios cerrados en donde las personas pueden estar expuestas a inhalación de radón y de sus descendientes de vida corta; estos lugares en específico son:

- a) Viviendas.
- b) Universidades.

- c) Escuelas.
- d) Edificios estatales.
- e) Hospitales.
- f) Centros de negocio.

De igual manera la metodología se podrá aplicar a estudios ambientales (pueden ser estudios en cuevas turísticas, campos geotérmicos y balnearios o establecimientos termales).

A continuación, en la Figura 4.1 se puede observar el resumen de pasos a seguir para la puesta en marcha de la propuesta de la metodología.

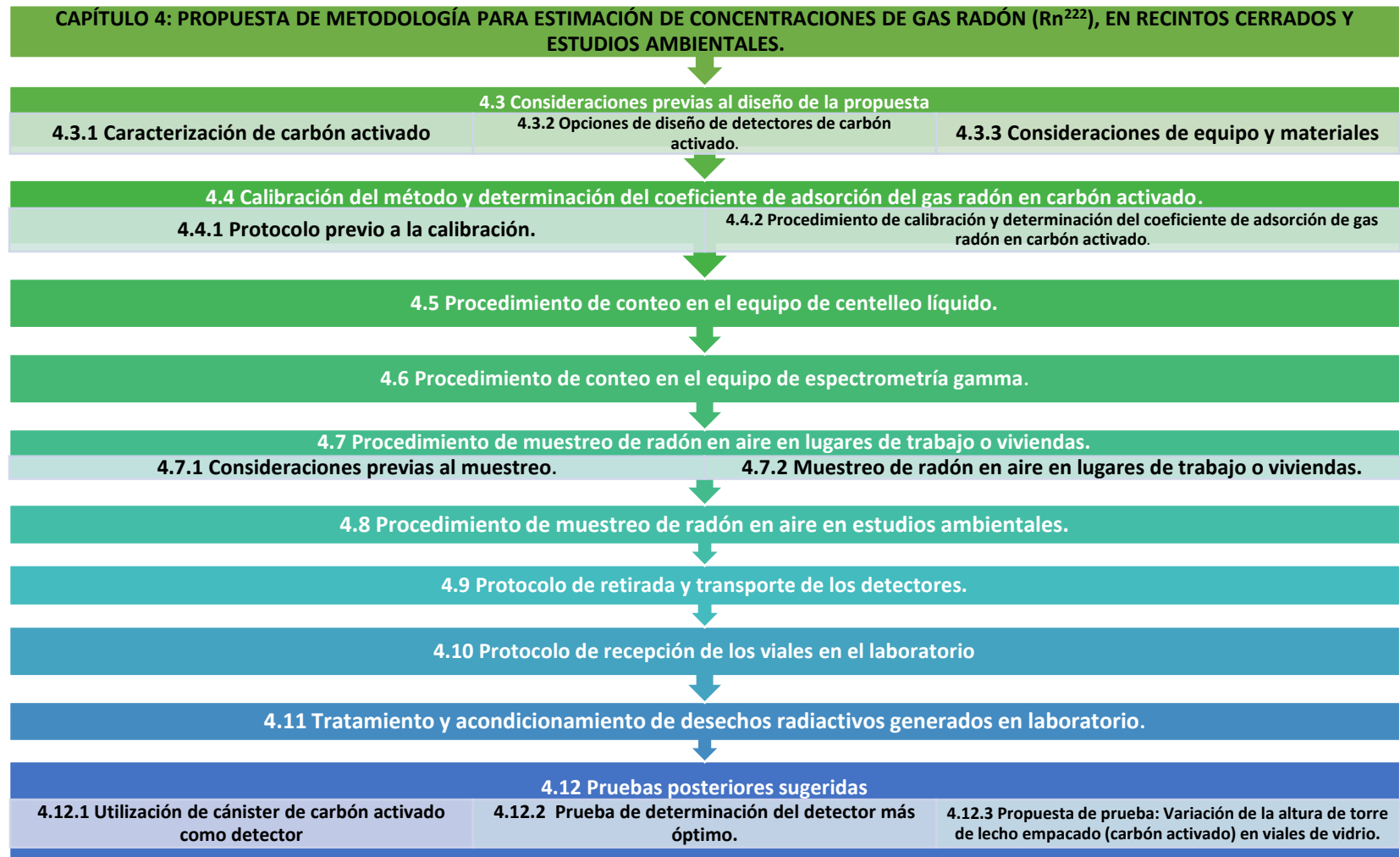


Figura 4.1: Propuesta de metodología para estimación de concentraciones de gas radón (Rn²²²), en recintos cerrados y estudios ambientales.

4.3 CONSIDERACIONES PREVIAS AL DISEÑO DE LA PROPUESTA.

Previo a la ejecución de la metodología, para medición de la concentración de gas radón en aire, es necesario revisar algunos aspectos, además de desarrollar diversos procedimientos y pruebas que garanticen el buen desarrollo de la metodología y por lo tanto el nivel de confianza en las estimaciones como resultado de la investigación. Lo cual se detalla en las siguientes secciones.

4.3.1 Caracterización de carbón activado.

En todo estudio de medición de radón con principio de adsorción de carbón activado, es importante caracterizar el carbón utilizado en la elaboración de los detectores mediante parámetros físicos y químicos como pH, densidad aparente y contenido de cenizas (véase la Tabla 2.5), debido a que estos parámetros primarios condicionan el coeficiente de adsorción de gas radón en carbón activado (parámetro que provee información de la capacidad que posee el carbón para adsorber moléculas de radón en la superficie); es por ello que si no se cuenta con los valores de los parámetros proporcionados por el proveedor, se debe realizar la caracterización por medio de los procedimientos de las normas ASTM D5832-98, D2854, D3838, D2866-94 y D2867-99 (Los procedimientos de caracterización y cálculos se detallan ampliamente en el Anexo 2).

En la Tabla 4.1 se muestran los parámetros necesarios para caracterizar el carbón activado, y las normas ASTM respectivas que rigen la estandarización de tales parámetros.

Tabla 4.1: Normas ASTM con las que se evalúan los principales parámetros para caracterizar un carbón activado dentro de la metodología propuesta.

Parámetro	Normativa
Contenido de material volátil	ASTM D5832-98
Densidad aparente	ASTM D2854
Granulometría	ASTM D2862-97
Humedad	ASTM D2867-99
pH	ASTM D3838
Contenido de cenizas	ASTM D2866-94

Los procedimientos de caracterización de carbón activado deben realizarse cada vez que se utilice distinto lote de carbón activado. Además, si existe la necesidad de la fabricación de carbón activado se sugiere un método a partir de la estopa de coco, para ello revisar el Anexo 1 en donde se describe el procedimiento respectivo.

La utilización en base a estopa de coco promueve el uso de metodologías verdes, en este caso la obtención carbón activado a partir de materiales orgánicos que contengan un elevado contenido de carbono y baja cantidad de cenizas como cáscaras y residuos de frutas, cuercos de nueces y desechos agrícolas de origen maderero.

Una vez caracterizado el lote de carbón activado a utilizar durante la metodología, se deben comparar los valores de los parámetros fisicoquímicos obtenidos con los valores que debe tener un buen carbón activado (encontrados en la bibliografía), en la Tabla 4.2 y 4.3 se muestran dichos valores.

Tabla 4.2: Principales parámetros con los que se especifica un carbón activado granular de origen mineral.

Parámetro	Unidades en las que se expresa	Rango óptimo	Norma
Densidad aparente	g/cm ³	0.26-0.65	ASTM-D2854
Contenido de cenizas totales	% base seca	3 a 15	ASTM-D2866
pH	pH	2 a 11	ASTM D3838
Humedad (Al empacar)	%	2 a 15	ASTM D2867
Rango de tamaño de partícula	Malla estándar americana	4x6, 4x8, 4x10	AWWA B604-90

Fuente: (Ariza, Echeverry, Fonthal, Prías y Rojas, 2011).

Tabla 4.3: Datos técnicos del carbón activado de cáscara de coco 1100, fabricado a nivel industrial por Carbones Mexicanos con calidad internacional requerida.

Datos técnicos	Valor	Norma que cumple
pH	7-8	ASTM D-3838
Dureza	98%-99%	ASTM D-3802
Cenizas totales	3% máx.	ASTM D-2866
Densidad aparente (g/cm ³)	0.44-0.49	ASTM D-2854
Humedad al empacar	3% máx.	ASTM D-2867

Fuente: (CARBONES MEXICANOS, s.f).

4.3.2 Opciones de diseño de detectores de carbón activado.

El diseño del dispositivo de muestreo con carbón activado es importante ya que de él depende: la efectividad para poder capturar mediante mecanismos de adsorción al radón en carbón activado, generando así estimaciones adecuadas que reflejen las condiciones del lugar de interés o del estudio en particular. Según los antecedentes bibliográficos encontrados, se pueden utilizar dos dispositivos que son igualmente competentes para capturar el radón, los cuales son el cánister de carbón activado y el vial de centelleo; para el desarrollo de la metodología se propone utilizar el vial de vidrio como detector de adsorción de carbón activado, su preparación y configuración se detalla a continuación.

4.3.2.1 Vial de vidrio.

Tomando como referencia al dispositivo utilizado por Canoba y López en el año 2001, el detector de adsorción es un vial de vidrio que contiene en la parte inferior una cama de carbón activado, sobre esta una barrera difusa y finalmente una capa de silica gel, en la Figura 4.2 se detalla de mejor manera el dispositivo. Según estudios anteriores como el realizado por Rodríguez Carpio (2013) se ha demostrado una mayor recuperación de concentración de actividad de radón (Rn^{222}) en los viales de vidrio de bajo contenido en potasio (K^{40}). El vial de vidrio debe de ser de bajo contenido de potasio (K^{40}) para no interferir significativamente en la medición de concentración de radón (Rn^{222}). El vidrio de borosilicato (o vidrio borosilicado de sodio) es el preferido y más utilizado en la mayoría de los equipos de laboratorio. Está compuesto en su mayor parte de sílice (70% a 80%), óxido de boro (7% a 13%) y en menor cantidad de álcalis (óxidos de potasio y de sodio) y de óxido de aluminio (véase la Tabla 4.4).

Tabla 4.4: Composición química típica del vidrio de borosilicato (% peso).

Componente	Porcentaje (aprox.)
SiO ₂	80.6%
B ₂ O ₃	13.0%
Al ₂ O ₃	4.0%
Na ₂ O, K ₂ O	2.3%
Otros elementos	0.1%

Fuente (Fisher Scientific, 2016).

El vidrio de borosilicato ofrece una mayor resistencia térmica y no se dilata como el vidrio tradicional. La transición entre temperaturas es fluida e incluso puede resistir gradientes de temperatura en su superficie. La tolerancia a temperaturas extremadamente altas y bajas hace del borosilicato un material de vidrio muy utilizado en los laboratorios. El radioisótopo de potasio (K⁴⁰) inherente al vial de vidrio de borosilicato posee una emisión aproximada de 1460 keV. Esto se puede apreciar en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Energías de emisión de algunos radioelementos.

Radioelemento	Energía (keV)
Pb ²¹²	238.6
Pb ²¹⁴	295.2, 351.9
Tl ²⁰⁸	583.0, 1592.5
Bi ²¹²	727.0
Ac ²²⁸	911.1
K ⁴⁰	1460.8

Fuente: (Barrera, Romero y Valiño, 2008).

A. Descripción del vial de vidrio

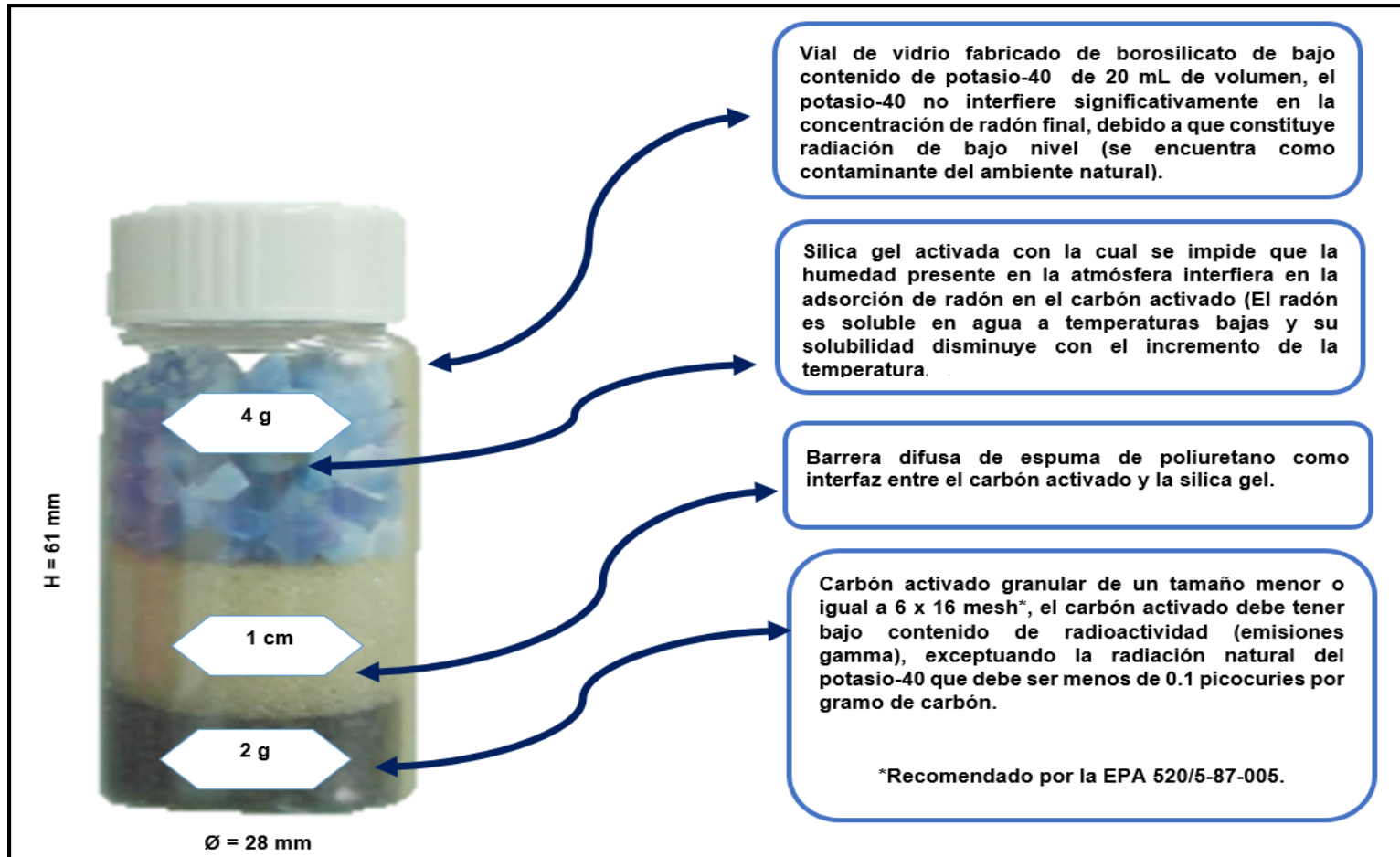


Figura 4.2: Vial de vidrio.

B. Preparación del vial de vidrio

En la Figura 4.3 se describen los pasos a seguir para la preparación del dispositivo de muestreo que será utilizado en la implementación de la presente metodología.

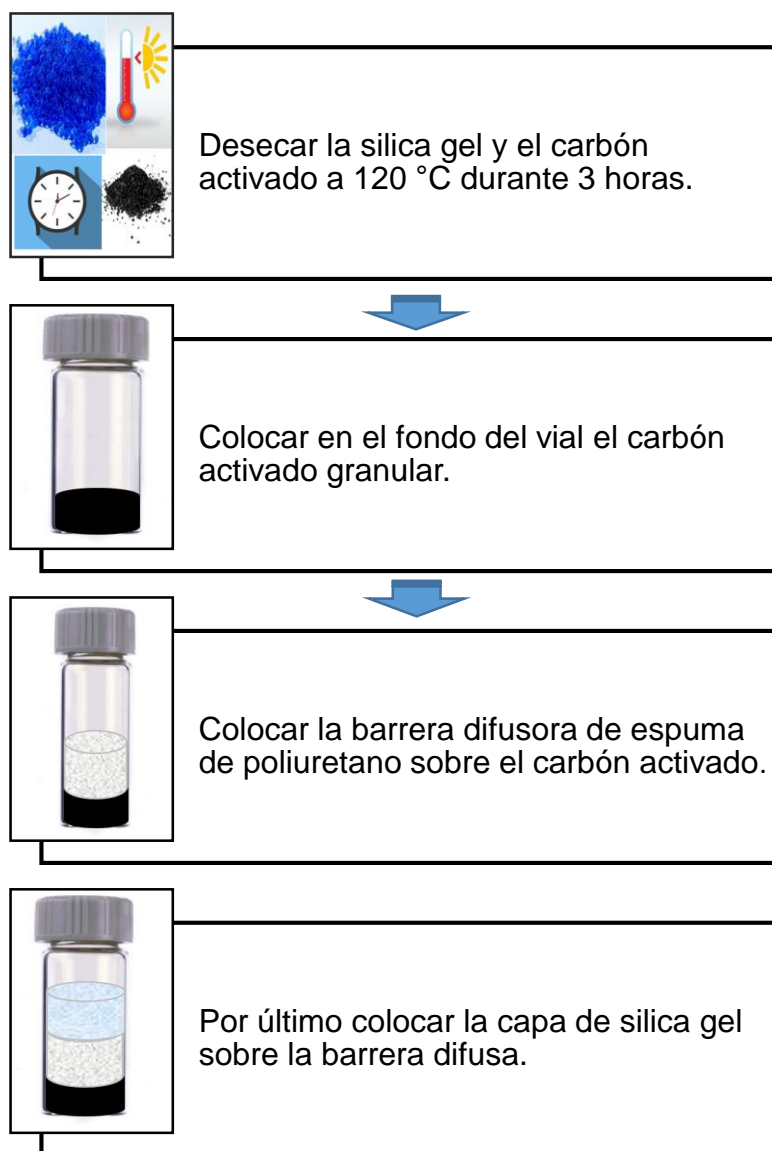


Figura 4.3: Preparación de vial de vidrio para la propuesta de la metodología según Canoba y López (2001).

4.3.3 Consideraciones de equipo y materiales.




Contar con una variedad de opciones en equipos que puedan controlar diferentes parámetros (temperatura, humedad y concentración de radón), presenta ventajas para poder plantear la metodología para estimación de concentraciones de gas radón en aire, puesto que permite poder comparar en cuanto a características de función, precio o accesibilidad que equipos pueden formar parte de la propuesta, además permite establecer limitaciones que pueden ser compensadas por un método alternativo, procurando siempre mantener el principio del método. En las siguientes secciones se describen los equipos y materiales que se tomaron en cuenta para la propuesta de diseño de la cámara de calibración.

4.3.3.1 Propuesta de diseño de cámara para calibración de la metodología.

El diseño y construcción de una cámara de calibración que pueda mantener condiciones de humedad y temperatura dentro de un rango constante es importante en la calibración de todo método experimental, ya que este equipo permite realizar pruebas previas a la implementación de la metodología simulando de manera acertada las condiciones presentes en campo, estas pruebas permiten obtener datos que posteriormente mediante un tratamiento matemático dan como resultado un factor de corrección al que están sujetas las medidas experimentales.

Son muchos los materiales con los cuales se pueden construir las cámaras de calibración, pero para la elección del sistema a proponer, se presentan las opciones de materiales y equipos a considerar en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Opciones para materiales o armadura de la cámara.

Opción	Material	Volumen	Fotografía	Hermeticidad/ Permeabilidad	Características	Disponibilidad
Cámara 1	Aluminio	1 m ³		Muy impermeable	<p>Posee en el interior un sistema de plataformas para ajustar la altura de los muestreadores.</p> <p>Se deberá agregar otro material de recubrimiento en las áreas de soldadura para sellar la cámara y lograr hermeticidad.</p> <p>Utilizada en otros estudios de difusión.</p>	Debe de adquirirse
Cámara 2	Acrílico (polimetilacrilato PMMA)	1 m ³		Baja difusión en PMMA (Según Wojcik, el coeficiente de difusión para radón de PMMA es 5×10^{-14})	<p>No se puede utilizar a temperatura muy alta.</p> <p>Permite fácil visualización del sistema y sensores en el interior.</p> <p>Espesor 3 mm.</p>	Debe de adquirirse
Cámara 3	Estufa al vacío	-			<p>Se complica la visualización de los sensores</p> <p>Sensores deberían estar al interior de cámara, pudiéndose generar alguna falla al largo plazo en los equipos, contaminación de equipo.</p>	Ya se cuenta con este equipo en el laboratorio CIAN-FIA-UES.

Fuente: (Núñez Gómez, 2019); (Medical EXPO, s.f); (Fisher scientific, s.f).

Después de evaluar la factibilidad, costos y funcionalidad, la propuesta de elaboración de la cámara de calibración es la que se describe a continuación, en donde la funcionalidad fue el principal parámetro de selección de los materiales.

A. Construcción de la cámara de calibración

La cámara de calibración se construirá de acrílico (polimetilacrilato PMMA), de 5 mm de espesor, transparente con dimensiones de longitud, alto y largo iguales a 1m, 1m y 1m, respectivamente siendo el volumen total de 1m^3 , con una puerta frontal abatible que posea empaques para que permita la hermeticidad, además debe contar con tres niveles donde se coloquen mallas removibles esto como soporte para la colocación de: muestras, fuente emanadoras, o dispositivos de medición que sean necesarios (véase la Figura 4.4). Además, en la parte superior deberá poseer agujeros para el ingreso de sensores de temperatura y humedad, termómetro de aceite, y una entrada para manguera con vapor de agua. Una de las ventajas de este material es que fácilmente se puede perforar según la necesidad de adaptación de nuevos accesorios y sellar con silicón para procurar la hermeticidad.



Figura 4.4: Ejemplo de sistema de empaques y puerta frontal de la cámara. Fuente: (AcrylicART, s.f).

Elementos necesarios en la cámara:

- a) **Rejillas (repisas) removibles:** estas bandejas deberán ser rejillas removibles en niveles ajustables donde pueda colocarse: las diversas fuentes emanasoras, los dispositivos de carbón activado en exposición, silica gel para control de humedad y otros dispositivos de medición. Estas podrán ser de metal o del mismo material de acrílico, como las mostradas en la Figura 4.5.



Figura 4.5: Ejemplo de repisas removibles dentro de cámara. Fuente: (MASTER SUPPLY, s.f).

- b) **Distribución de sensores (temperatura y humedad):** las entradas de los sensores a la cámara serán por la parte superior (véase la Figura 4.6), quedando acoplados en el mismo agujero con adhesivo o silicón.

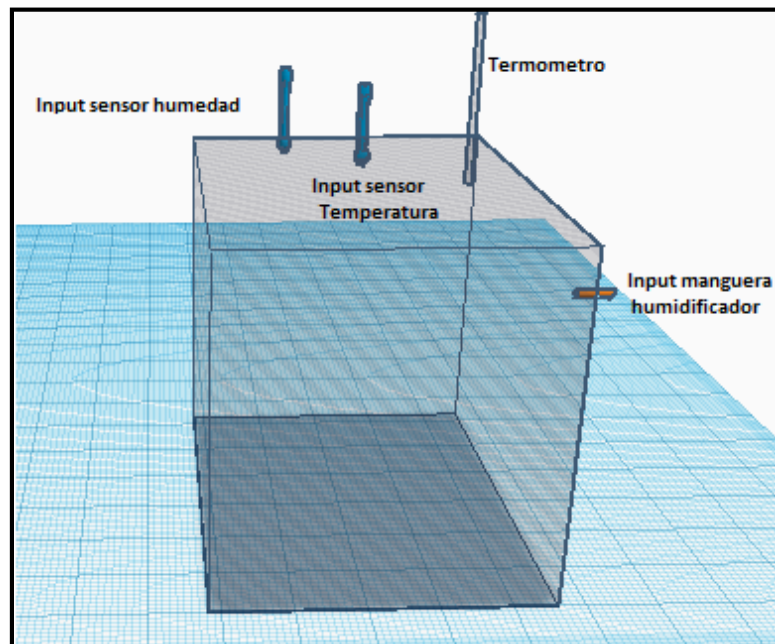


Figura 4.6: Esquema de entradas a la cámara.

- c) **Dispositivo para generación de calor y aumento de temperatura:** para el incremento de temperatura se utilizará una manta térmica, sujeta a la parte externa trasera de la cámara, por medio de un sistema de ventosas incluidas en el dispositivo.
- d) **Entrada de humidificador:** el dispositivo humidificador estará externo a la cámara, existiendo solo un agujero en la parte lateral para el acople de la manguera, que transporta el vapor de agua.
- e) **Bandeja de acrílico removible inferior:** en caso de mediciones en donde el interés es el cálculo de coeficientes de emanación de suelo, y se necesite hacer calibración con muestras de tierra impregnada, como fuente emanadora, se podrá colocar una bandeja en la parte inferior de metal o del mismo material acrílico de la cámara como lo muestra la Figura 4.7

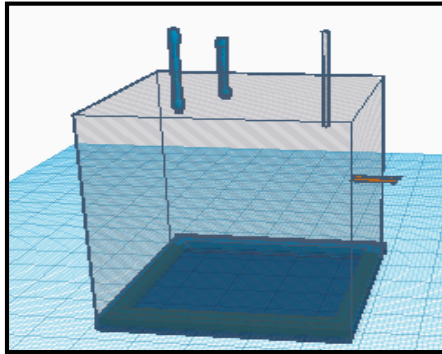






Figura 4.7: Ejemplo bandeja inferior/fuente emanadora tierra.

- f) **Agujeros para evitar vacíos:** en los laterales se deben tener agujeros sellados con empaques para retirarlos ocasionalmente para evitar la creación de vacío en el interior o colocar un pequeño agujero en la esquina superior derecha para evitar acumulación masiva en el interior.
- g) **Soportes externos para controladores de humedad y temperatura:** los equipos electrónicos controladores y lectores de humedad y temperatura deberán estar externos de la cámara y conectados con cable hacia el interior de la cámara.
- h) **Soporte para termómetro de aceite:** al igual que los sensores electrónicos el termómetro entrará por la parte superior sujetos con silicón o material adhesivo sellante.

En cuanto a los dispositivos para generación de calor, humedad y control del nivel de radón, se tiene una amplia variedad en el mercado algunos más especializados que otros; en la Tabla 4.7 se muestran los dispositivos encontrados en la web que presentan las mejores características que permiten realizar su función de forma eficaz y eficiente, y en la Tabla 4.8 se colocan las razones por las cuales se seleccionaron los equipos o dispositivos para formar el sistema de calibración, siendo la funcionalidad el principal factor de selección para todos los dispositivos. Además en las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10 se realiza una simulación de la construcción de la cámara.

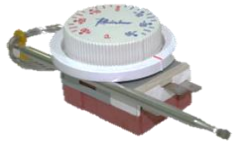


Tabla 4.7: Dispositivos encontrados en la web para el diseño de la cámara.

Función	Modelo	Fotografía	Características	Costos/ proveedor
Controlador de humedad	Inkbird IHC-200		<p>Fácil instalación. Permite lectura en tiempo real de humedad y control automático. Incluye sensores.</p>	<p>US\$75.43 (ver anexo 3, figura A.10)</p>
Controlador de humedad	Higrostató Mecánico IP20		<p>No incluye sensores. No muestra en tiempo real el valor de humedad. Controla humedad en el rango de 35%-95%.</p>	<p>Servielectric S.A de C.V</p>
Lector temperatura	Termómetro de aceite		<p>Permite solamente la lectura de la temperatura, dentro de la cámara, pero no proporciona control de temperatura. Fácil adquisición.</p>	<p>Electrolab Medic</p>
Controlador de temperatura	InkBird ITC-308		<p>Permite visualización y control de temperatura. Fácil instalación.</p>	<p>-----</p>

Fuente: (INKBIRD, s.f); (Servielectric Industrial, s.f); (Gesa, s.f)

Continúa...

Tabla 4.7: Dispositivos encontrados en la web para el diseño de la cámara (Continuación).

Función	Modelo	Fotografía	Características	Costos/ proveedor
Controlador de temperatura	Termostato		<p>No permite visualización de la temperatura en tiempo real. Permite el control automático. Controla en un rango de -30 a +30 °C.</p>	Servielectric S.A de C.V
Controles de nivel de radón	Detector Corentium Home Radon Airthings		<p>Rango de detección: 0 – 500 pCi/L. Rango de T operación: 39°F a 104°F.</p>	US\$226.14 (ver anexo 3, figura A.11)
Control de nivel de radón	RADEX MR107		<p>Permite lectura de actividad de volumen de equilibrio equivalente. Incluye lecturas de temperatura y humedad, aunque no podría reemplazar a los controladores de H y T ya que no funciona como controlador. Debido a que los sensores están integrados en el equipo, complica el mantenimiento o reparación del mismo.</p>	----

Fuente: (Servielectric Industrial, s.f); (Airthings, s.f); (QUARTA, s.f).

Continua...

Tabla 4.7: Dispositivos encontrados en la web para el diseño de la cámara (Continuación).

Función	Modelo	Fotografía	Características	Costos/ proveedor
Generación de calor	iPower Almohadilla Calentadora para Terrarios		Permite control y visualización de temperatura en cámara. Fácil instalación.	US\$69.48. (ver anexo 3, figura A.12)
Generador de vapor de agua	Humidificador de terrario		Capacidad de 2.5 L.	-----
Generador de vapor de agua	Nebulizador Rossmax		Menor capacidad respecto a humidificador de terrario.	US\$46.99 (Price Smart) (ver anexo 3, figura A.13)

Fuente: (Amazon, s.f); (Pricesmart, s.f).

Tabla 4.8: Dispositivos, equipos o materiales considerados para formar el sistema de calibración.

Dispositivo/Equipo	Razón de selección
1. Cámara de acrílico de 1 m³	El material de construcción permite visualizar el interior de la cámara y mantener una vigilancia constante durante la medición, además el costo no es muy elevado.
2. Controlador de temperatura (manta calefactora)	El dispositivo controla de manera eficiente la temperatura, su instalación es fácil y el costo es bajo.
3. Sensor de humedad InkBird IHC200, junto con humidificador de terrario	Muestra en tiempo real el valor de la humedad dentro de la cámara, es fácil de instalar e incluye sensores para mejor detección de la humedad.
4. Detector Corentium Home Radon Airthings	Rango de detección alto, además permite obtener lecturas de temperaturas durante la medición y proporciona lecturas continuas de radón.
5. Termómetro	Permite obtener lecturas de temperatura y su costo es bajo.
6. Fuente emanadora	Permite contar con una fuente que proporcione exhalación de gas radón para posterior adsorción en carbón activado.
7. Vial con silica gel, membrana y carbón activado	Dispositivo de fácil preparación y manejo, detector pasivo con principio de adsorción en carbón activado.
8. Cronómetros	Permite llevar registro de tiempos de exposición.
9. Hojas de registro de datos	Permite llevar registros de manera digital de todos los datos relacionados a la metodología.

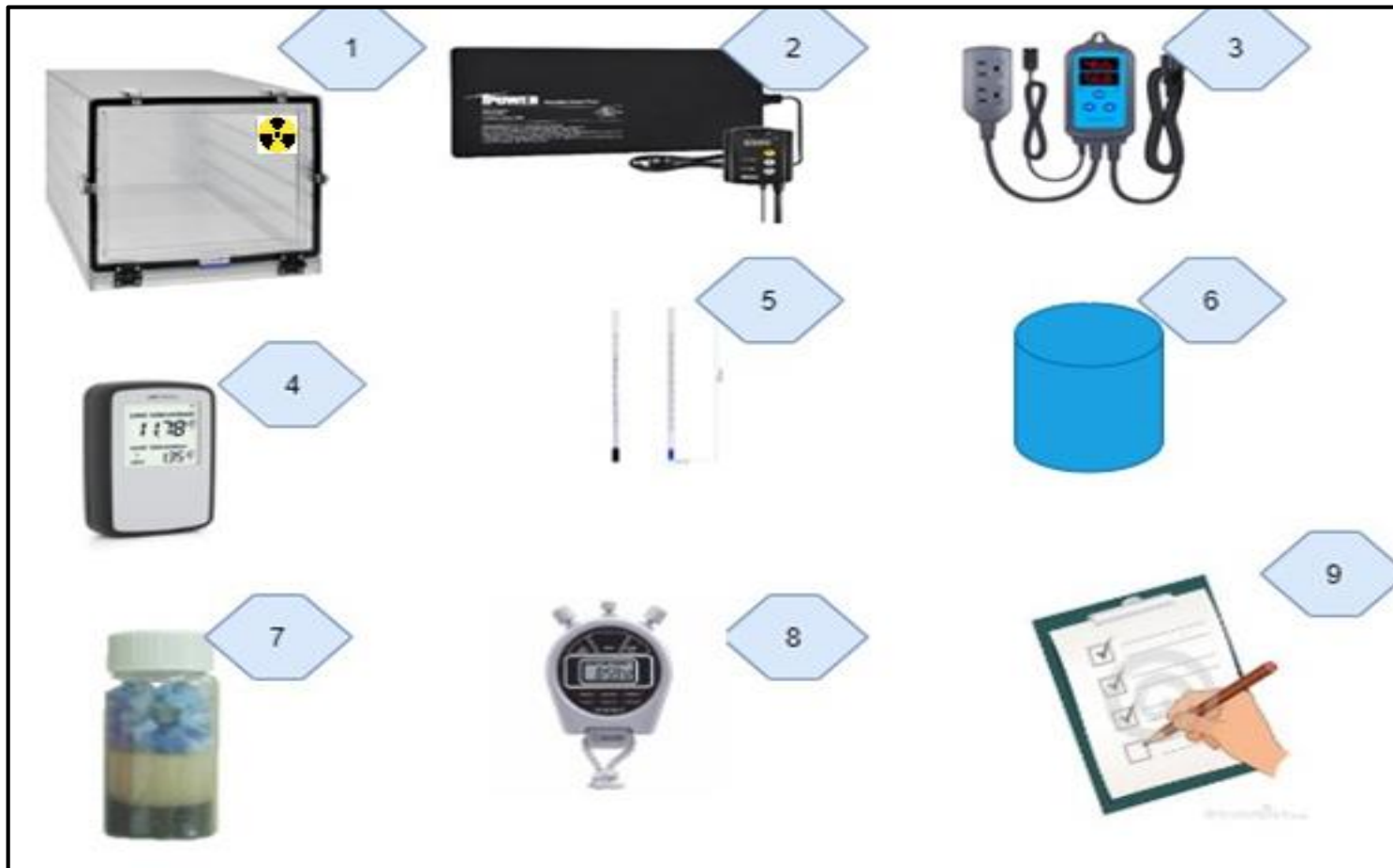


Figura 4.8: Dispositivos, equipos o materiales considerados para formar el sistema de calibración.
(Con respecto a la Tabla 4.8).

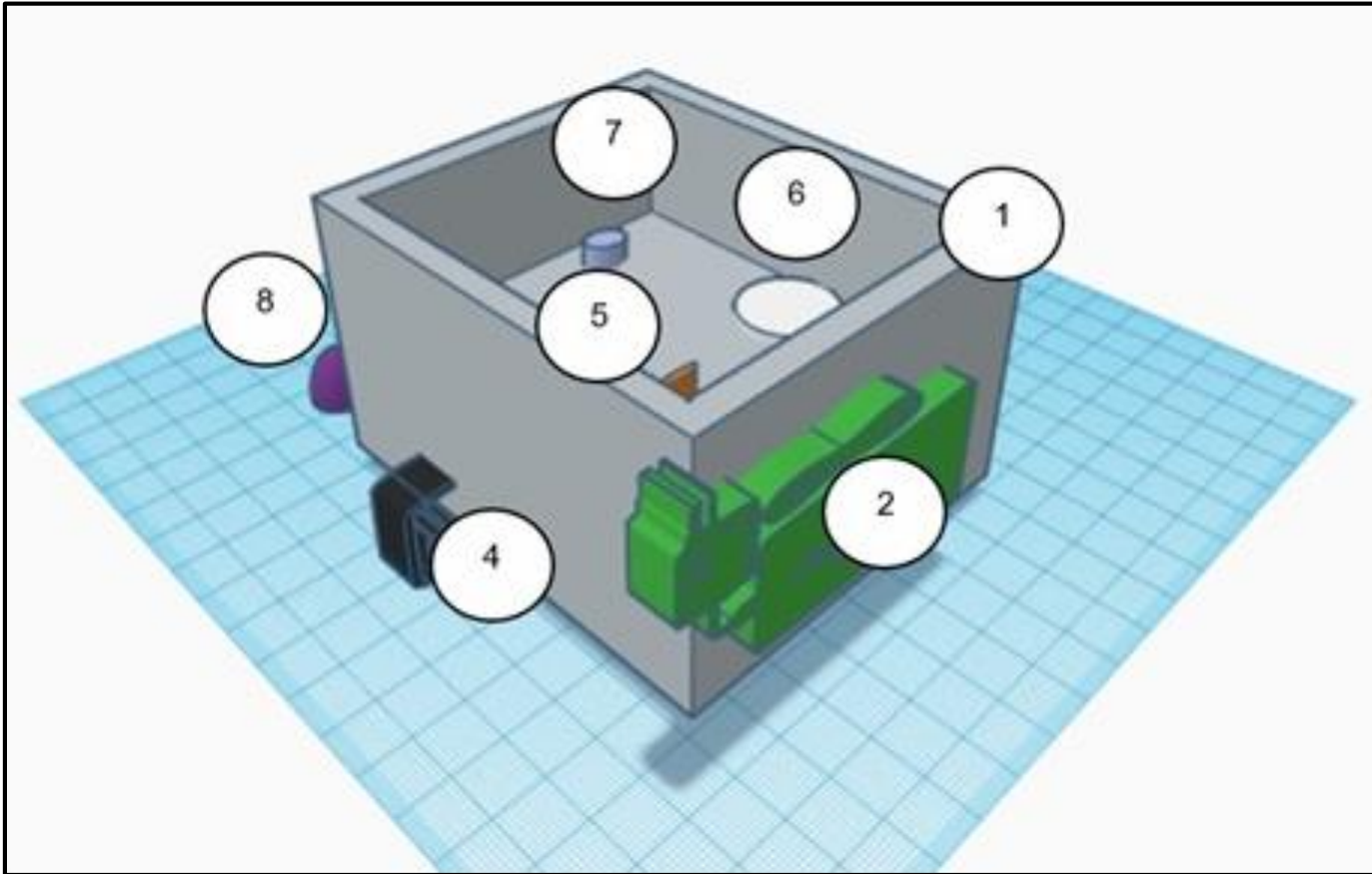


Figura 4.9: Vista lateral derecha de diseño de la cámara de calibración con dispositivos propuestos. (Referencia: Tabla 4.8).

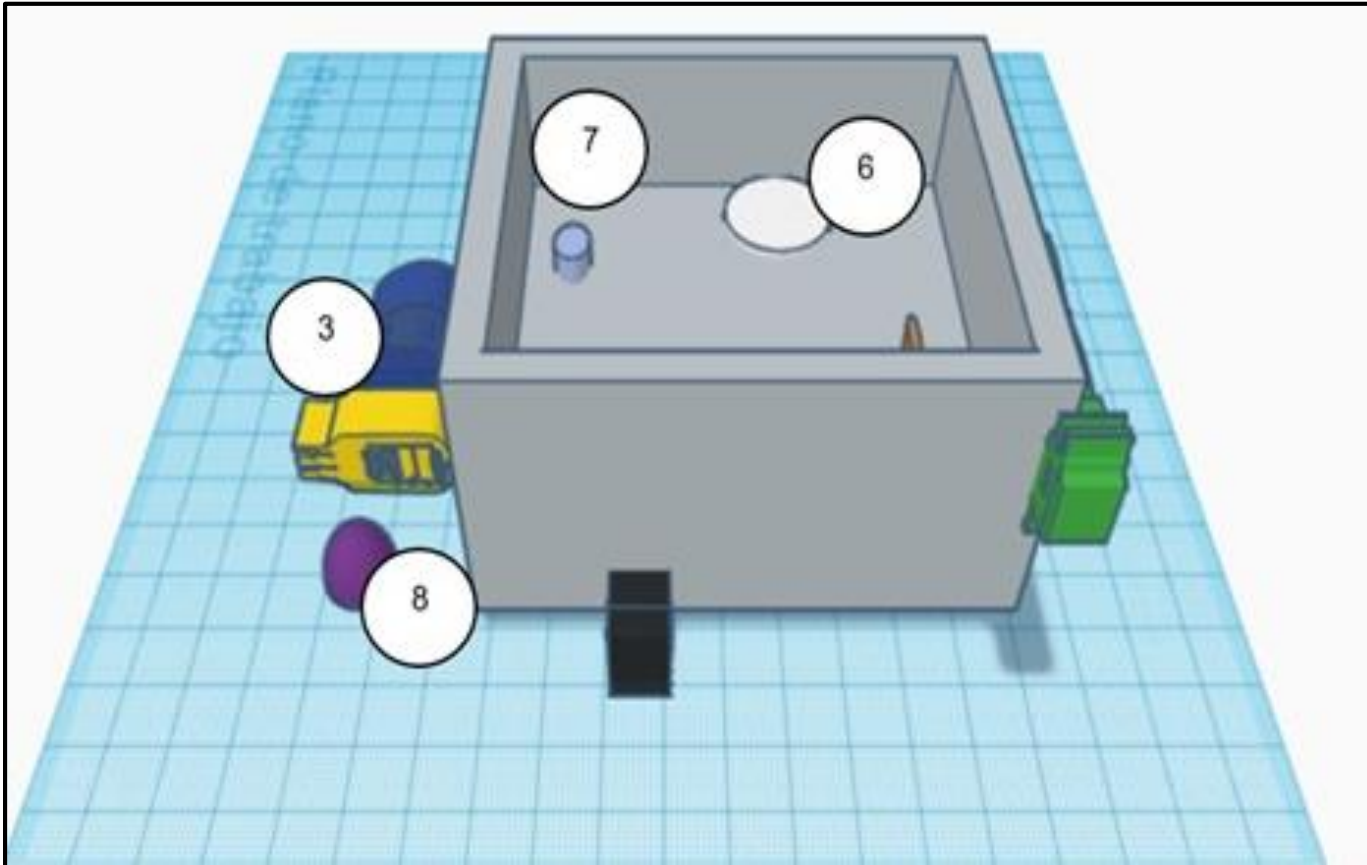


Figura 4.10: Vista frontal de diseño de la cámara de calibración con dispositivos propuestos. (Referencia: Tabla 4.8).

4.3.3.2 Fuentes emanadoras.

Una fuente emanadora de gas radón proporciona un sistema natural o artificial (preparado en laboratorio) de actividad de radón, transportado y exhalado al aire de manera conveniente para crear un ambiente saturado de átomos de radón que son adsorbidos por la superficie de los poros de carbón activado; para el planteamiento de esta metodología es importante contar con una fuente en las etapas de calibración del método por lo que en los siguientes apartados se describen los materiales disponibles con los cuales cuenta el laboratorio del CIAN-FIA-UES que se pueden utilizar para preparar una fuente emanadora con concentración conocida de radón, de la misma manera se esquematizan los procedimientos para preparar dichas fuentes.

A. Materiales disponibles

Para el proceso de calibración del método, se posee diferentes formas de generar emanación de gas radón dentro de la cámara, el laboratorio del CIAN-FIA-UES cuenta con diversos materiales que pudiesen ser utilizados para este fin, de los cuales se tienen estimaciones de su actividad, que servirán para la evaluación del método propuesto. Los materiales de referencia con los que se cuenta son dos donados por Costa Rica (CICANUM-UCR) con certificado SMR 4967 y otro elaborado en el laboratorio del CIAN, todos en solución. Además, se posee una roca con contenido de uranio natural para la cual se realizó una estimación de la concentración de radón emanado y un material de referencia de suelo que contiene Ra^{226} . Esta información y la de otros materiales de referencia se detalla en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Materiales de referencia disponibles.


Material de referencia	Actividad/concentración emanada (Rn ²²²)
CIAN	9.948 Bq/mL
IRD	3.8 Bq/mL
NIST-01	4.567Bq/mL
Roca	0.00814Bq/mL
Suelo	19 Bq/g

Fuente: (CIAN-FIA-UES).

B. Métodos para generar emanación de gas radón



A partir de los materiales disponibles se pueden preparar diversas fuentes emanadoras, en la Tabla 4.10 se muestran las consideradas para la propuesta.

Tabla 4.10: Opciones de preparación de la fuente emanadora.

Fuente emanadora		Descripción general	Observaciones
Roca (Emanación directa)		Se puede colocar directamente la roca emanadora en la cámara acrílica de pruebas en la parte inferior para que se dé el proceso de difusión.	Se conoce un estimado anterior de la emanación de radón desde la roca con este dato se puede trabajar como base para el planteamiento de la concentración en la cámara. Estos valores pudiesen corroborarse con los valores adsorbidos en el carbón activado y con apoyo de otro detector de radón (Detector Corentium Home Radon Airthings) como él que se encuentra dentro de la cámara.

Continua...

Tabla 4.10: Opciones de preparación de la fuente emanadora (Continuación).

Fuente emanadora		Descripción General	Observaciones
Tierra impregnada de solución de Ra ²²⁶		La solución con actividad conocida se agrega a la tierra, y luego esta tierra puede simular la emanación natural desde el suelo.	Considerar las interferencias posibles debido a la actividad de radón en la tierra previa a agregar solución de actividad conocida.
Gasa impregnada		La gasa es impregnada con solución de Ra ²²⁶ conocida, y colocándola dentro de la cámara hasta que el radón se transfiera al aire dentro de la cámara	Considerar hacer pruebas previas para determinar la cantidad óptima de impregnación para que la concentración en aire sea detectable para las pruebas y calibraciones posteriores

I. Preparación de la fuente de radiación de referencia

De forma general el proceso de generación de fuente emanadora, según la elección de la fuente se muestra en el flujograma de la Figura 4.11 y se describe a detalle en la presente sección:

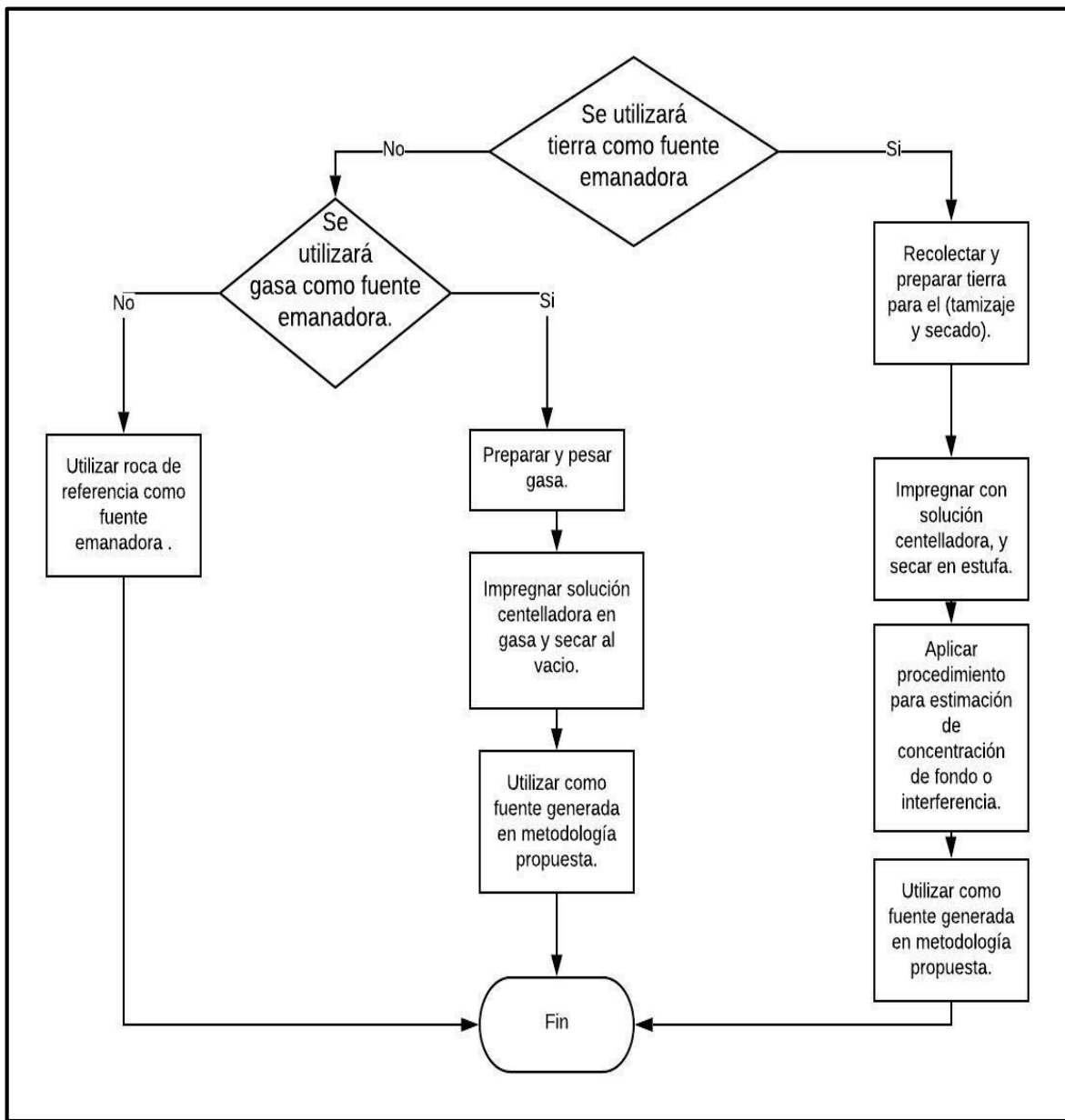


Figura 4.11: Preparación de fuente emanadora.

a. Preparación de la fuente de radiación de referencia con solución de Ra^{226} impregnada en tierra

Si se utiliza la tierra impregnada con solución de radio, se deberá ejecutar los procedimientos descritos en las Figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16 de las secciones a.1, a.2, a.3, a.4 y a.5.

a.1 Recolección tierra



Figura 4.12: Recolección de tierra a utilizar para la preparación como fuente emanadora de radón.

a.2 Procesamiento de tierra

Inmediatamente a su recolección y limpieza, la tierra seleccionada debe de ser procesada antes de realizarle las pruebas de densidad aparente y posterior preparación como fuente emanadora final.

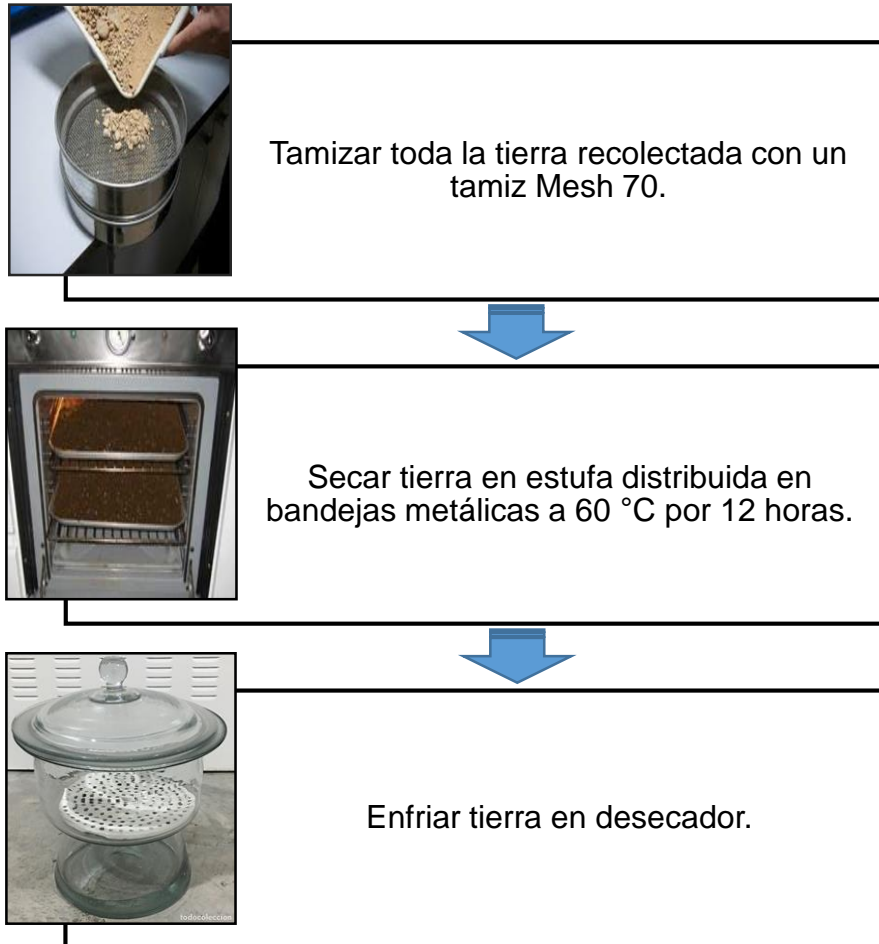


Figura 4.13: Procesamiento de la tierra recolectada.

a.3 Determinación de densidad aparente

Para este proceso se siguen los procedimientos descrito por la norma ASTM C29/C29M-97.



Pesar recipientes medidores vacíos.



Llenar los recipiente medidores con tierra seca.



Proceder a pesar recipiente medidor más tierra seca.



Realizar los calculos correspondientes para conocer la densidad aparente.

Figura 4.14: Determinación de la densidad aparente de la tierra a utilizar. Fuente: Con base a la norma ASTM C29/C29M-97.

a.4 Preparación de fuente emanadora (tierra).

En la preparación de la fuente emanadora a partir de tierra se tomó como referencia la concentración inicial sugerida en el procedimiento desarrollado por Fuente Lastra (2016), en el cual se trabajó con una actividad de radio natural en tierra de 10.245 Bq/g.

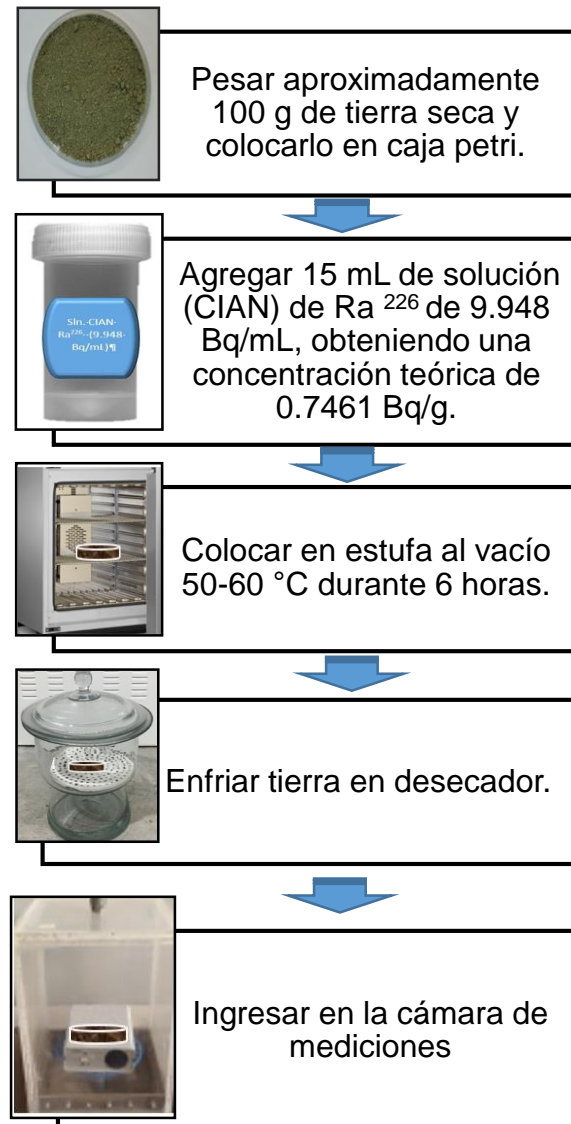


Figura 4.15: Preparación de la tierra como fuente emanadora. Fuente: (Fuente Lastra, 2016)

Cuando se utilice como fuente emanadora la tierra impregnada es necesario determinar la concentración de fondo o que ya viene incluida en la tierra para esto se seguirá el procedimiento esquematizado en las Figura 4.16 y 4.17.

a.5 Procedimiento de determinación de concentración de radio (Ra^{226}) y radón (Rn^{222}) de fondo

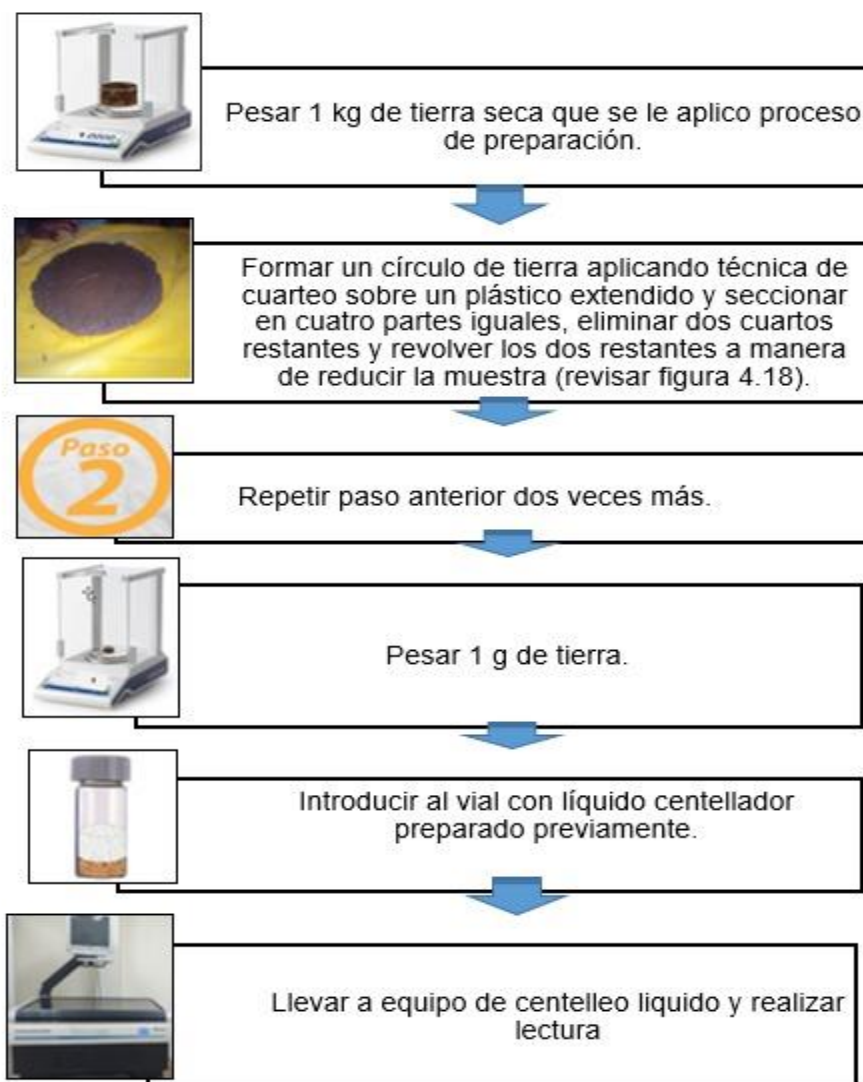


Figura 4.16: Determinación de concentración de Rn^{222} y Ra^{226} de fondo de la tierra.

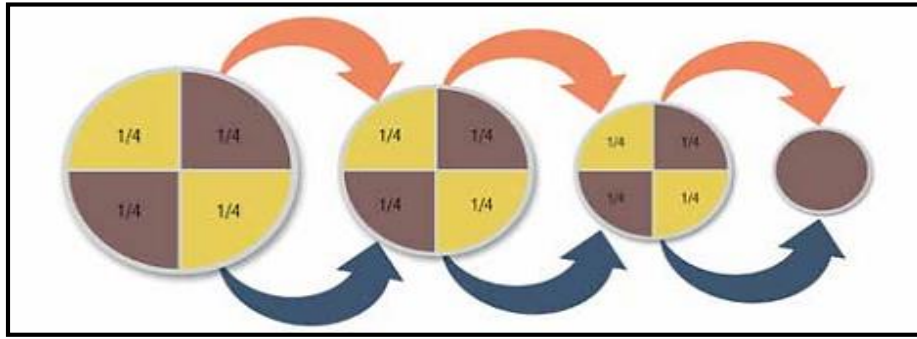


Figura 4.17: Método del cuarteo utilizado en el procedimiento de determinación de concentración de Rn^{222} y Ra^{226} de fondo. Fuente: (MARN-Guatemala, 2018).

a.6 Cálculo de densidad aparente y concentración de radio en tierra seca

Cuando se utilice tierra impregnada como fuente emanadora se determinan algunos parámetros de los que se debe llevar registro. Además, es necesario ejecutar el procedimiento de densidad aparente para la tierra, con base en la norma ASTM C29/C29M-97. Se recolectarán los datos, aplicando las Ecuaciones 4.1 y 4.2, detalladas en las Tablas 4.11 y 4.12.

Tabla 4.11: Datos para determinación de densidad aparente de tierra seca.

Descripción	Símbolo	Unidades	Ecuación de cálculo	Observación	Parámetro: entrada /salida
Peso de tierra que cabe en el cilindro.	M_{tierra}	g		Según procedimiento de sección a.3. Procurar que sea una medida para 200 g de tierra seca previamente tamizada y secada.	Entrada
Volumen de cilindro (según norma ASTM C29/C29M-97).	$V_{cilindro}$	mL		Según procedimiento de sección a.3.	Entrada
Densidad aparente de tierra.	ρ_{tierra}	g/mL	$\rho_{tierra} = (M_{tierra}) / V_{cilindro}$ Ec. 4.1		Salida

Tabla 4.12: Datos para determinar la concentración de radio inicial en la tierra.

Descripción	Símbolo	Unidades	Ecuación de calculo	Observación	Parámetro entrada/salida
Cantidad de solución de radio de referencia agregada a tierra	$V_{sol-impreg}$	mL		Se sugiere agregar 100 mL de solución CIAN, aunque pudiera ajustarse según experimentos preliminares	Entrada
Concentración de actividad de solución de radio de referencia	$[R_{solución}]$	Bq/mL		Solución CIAN este valor es 9.948 Bq/mL	Entrada
Cantidad de tierra emanadora	M_{tierra}	g		Se sugiere 100 g pero se puede ajustar según experimentación previa.	Entrada
Concentración inicial de radio en tierra	$[Rd_0]$	Bq/g	$[Rd_0] = \frac{\text{volumen de solución (concentración de solución)}}{\text{cantidad de tierra impregnada}}$ <p style="text-align: center;">Ec. 4.2</p>	Según valores sugeridos será 9.948 Bq/g se toma como referencia Fuente Lastra (2016), que usa una concentración de 10.25 Bq/g.	Salida

b. Preparación de la fuente de radiación de referencia con solución impregnada en gasa

Si se utiliza gasa como fuente emanadora se sugiere el procedimiento descrito en la Figura 4.18, esto está sujeto a resultados experimentales que indiquen que se pueda garantizar el proceso de exhalación desde la gasa.

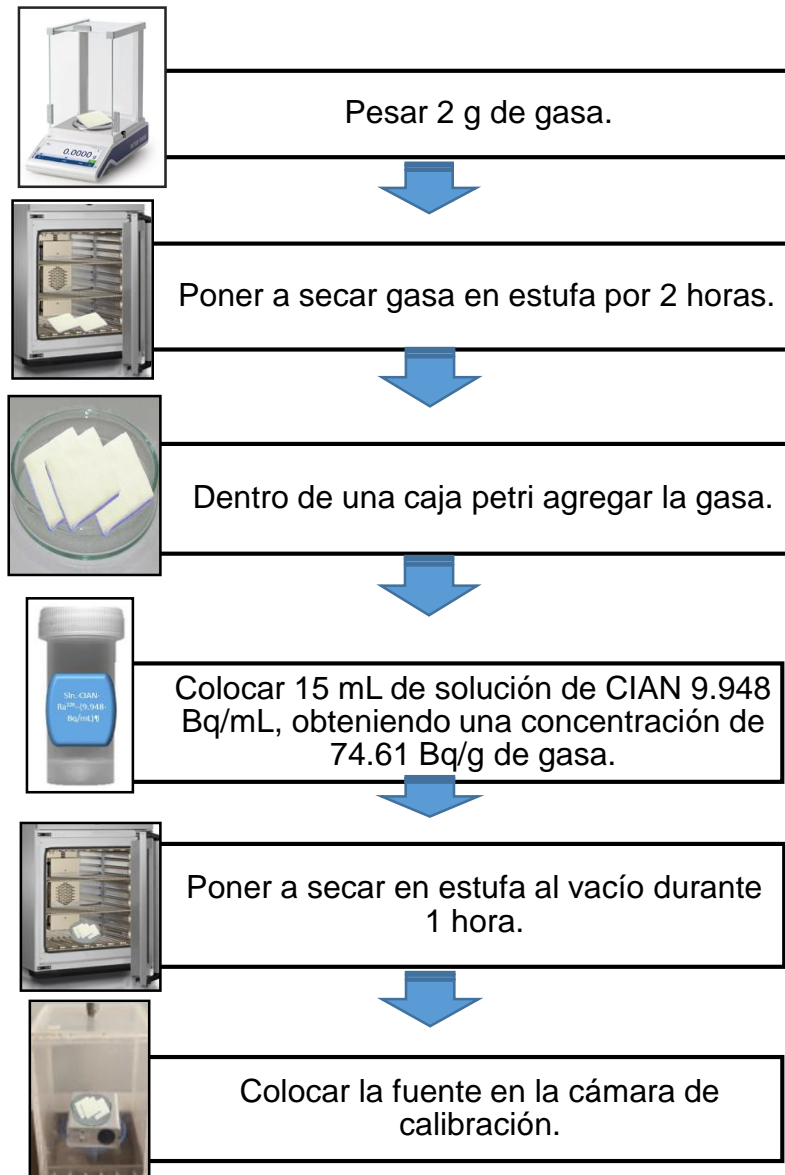


Figura 4.18: Preparación de la fuente emanadora con solución de referencia en gasa impregnada.

Para tierra y gasa impregnada, como fuentes emanadoras según los resultados iniciales y para asegurar el proceso de exhalación, se recomienda probar diferentes preparaciones, variando la concentración de la solución, en proporción de doble o triple concentración. Además, para la gasa impregnada se utiliza la Ecuación 4.3 descrita en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13: Procedimientos a realizar para utilizar gasa como fuente emanadora.

Descripción	Símbolo	Unidades	Ecuación de calculo	Observación	Parámetro entrada/salida
Cantidad de solución de radio de referencia agregada a gasa.	$V_{sol-impreg}$	mL		Se sugiere agregar 15 mL de solución CIAN, aunque pudiera ajustarse según experimentos preliminares.	Entrada
Concentración de actividad de solución de radio de referencia.	$[R_{solución}]$	Bq/mL		Solución CIAN de concentración 9.948 Bq/mL.	Entrada
Cantidad de gasa.	M_{gasa}	g		Se sugiere 2 g pero se puede ajustar según experimentaciones.	Entrada
Concentración inicial de radio en gasa.	$[Rd_0]$	Bq/g	$[Rd_0] = \frac{\text{volumen de solución (concentración de solución)}}{\text{cantidad da gasa impregnada}}$ Ec. 4.3	Según valores sugeridos será 74.61 Bq/g.	Salida

II. Cálculos etapa preparación de fuentes emanadoras con rocas con contenido de uranio

Al utilizar como fuente emanadora rocas con contenido de uranio necesitamos caracterizarlas obteniendo parámetros de área superficial y otros de interés. Se miden las longitudes según la Tabla 4.14, obteniendo con un calibrador vernier los valores de la longitud: más larga apreciable de la roca (L_1), longitud normal (L_2), y la longitud normal a L_1 y L_2 .

Tabla 4.14: Caracterización de roca de uranio (U^{238}) como fuente emanadora.

Descripción	Símbolo
Longitud más corta	L_1
Longitud normal a L_1	L_2
Longitud normal a L_1 y L_2	L_3
Diámetro promedio	$L_p = (L_1 + L_2 + L_3) / 3$
Superficie de la esfera	$S = 4\pi L_p^2$

Con estas tres longitudes se calcula una longitud promedio que será nuestro diámetro promedio de partícula, para luego sustituirlo en la ecuación de la superficie de una esfera para obtener el valor del área superficial.

Además, para comparar el valor obtenido a través de la definición de un diámetro promedio, se cubrirá la piedra con segmentos de papel aluminio de área previamente medidos a manera de envolverla, evitando dobleces para lograr una mejor aproximación.

4.4 CALIBRACIÓN DEL MÉTODO Y DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ADSORCIÓN DEL GAS RADÓN EN CARBÓN ACTIVADO.

La importancia de la calibración es obtener datos y curvas a diferentes condiciones de humedad (modifica el coeficiente de adsorción de gas radón) y así aplicar el tratamiento matemático adecuado para la investigación en curso y obtener los factores de calibración, esta calibración debe realizarse para cada investigación y para lotes de carbón activado diferentes, además de parámetros diferentes de humedad y temperatura.

Dentro del proceso de calibración se puede obtener el coeficiente de adsorción de gas radón en carbón activado, el cálculo del coeficiente de adsorción nos permite cuantificar la capacidad del carbón activado para adsorber radón, es por eso que es un parámetro importante en la selección del mejor carbón activado para el diseño de los detectores, ya que un coeficiente mayor nos permite tener una mejor adsorción de radón durante su exposición.

4.4.1 Protocolo previo a la calibración.

La calibración es una de las partes fundamentales en la realización de la metodología para la medición de radón (Rn^{222}) gaseoso, antes de su realización se deben implementar una serie de pasos, los cuales se resumen en la Figura 4.19.

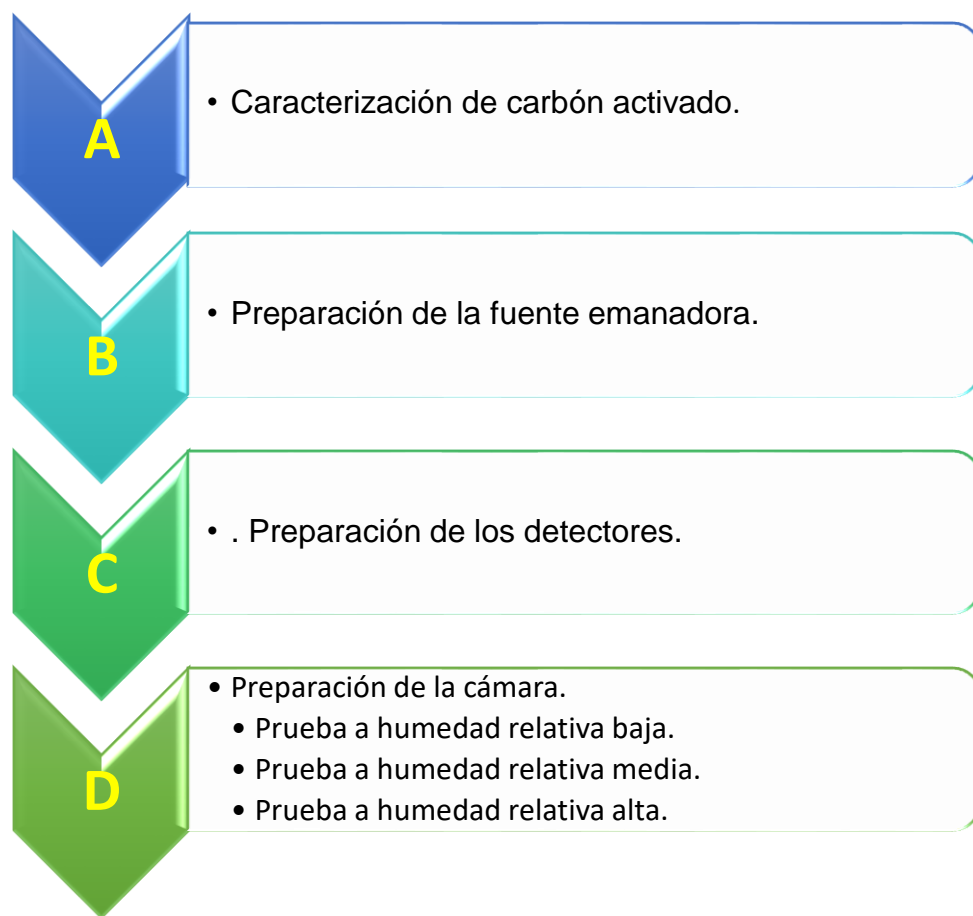


Figura 4.19: Pasos a seguir previos a la calibración.

- Caracterización de carbón activado (aplicar metodología explicada en Anexo 2).
- Preparación de la fuente emanadora, revisar el procedimiento de preparación de la fuente emanadora (sección 4.3.3.2, B, I).
- Preparación de los detectores (dispositivos de muestreo), seguir el procedimiento estipulado en la sección 4.3.2.1, B.

El personal que se encargue de la preparación y manipulación de la fuente emanadora debe utilizar el equipo de protección personal descrito en el Anexo 6.

d) Preparación de la cámara.

- i. Revisar que cada componente de la cámara este en buen estado y limpiar el interior con un paño seco.
- ii. Prueba a humedad relativa baja: Encender los controladores de la cámara y esperar hasta que se estabilicen los parámetros de temperatura y humedad (no será necesario conectar dispositivo de humidificación, si la humedad en la cámara es alta en este caso colocar más recipientes de silica gel presecada, esperando el tiempo necesario hasta que se establezca el nivel del 20% de humedad relativa).
- iii. Prueba a humedad relativa media: Encender los controladores de la cámara y esperar hasta que se estabilicen los parámetros de temperatura y humedad (será necesario conectar dispositivo de humidificación, si la humedad en la cámara es baja, esperar hasta que el humidificador logre el nivel deseado del 50% de humedad relativa).
- iv. Prueba a humedad relativa alta: Encender los controladores de la cámara y esperar hasta que se estabilicen los parámetros de temperatura y humedad (será necesario conectar dispositivo de humidificación, si la temperatura en la cámara es baja, esperar hasta que el humidificador logre el nivel deseado de humedad relativa del 80 %).

4.4.2 Procedimiento de calibración y determinación del coeficiente de adsorción de gas radón en carbón activado

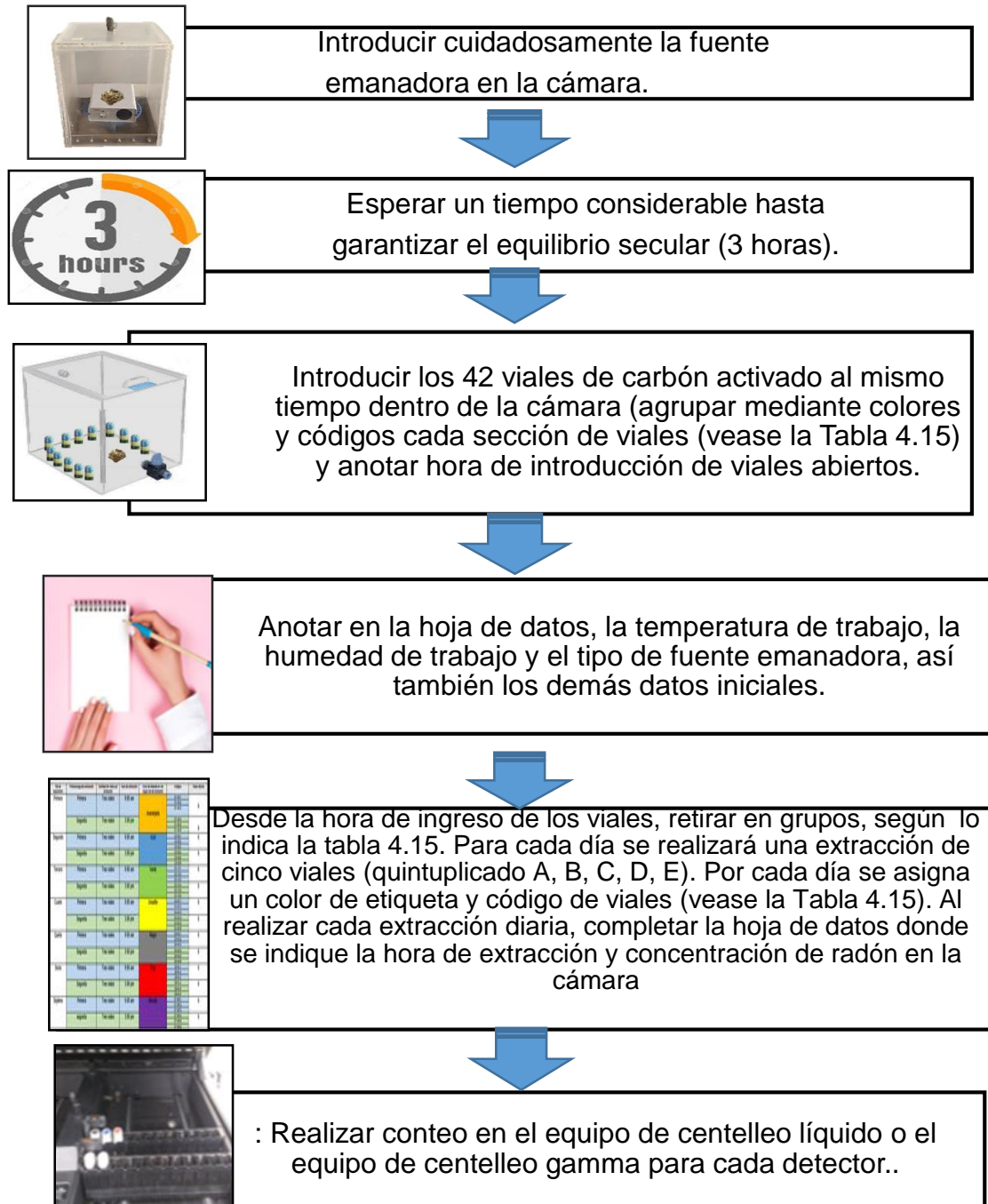


Figura 4.20: Determinación del coeficiente de adsorción de gas radón en carbón activado.

Tabla 4.15: Forma de extracción de viales y etiquetado.

Día de exposición	Primera/segunda extracción	Cantidad de viales por extracción	Hora de extracción	Color de etiqueta en vial según día de extracción	Códigos	Viales diarios
Primero	Primera	Tres viales	9:00 a.m	Anaranjado	D1-AN-1	6
					D1-AN-2	
					D1-AN-3	
	Segunda	Tres viales	3:00 p.m		D1-AN-4	
					D1-AN-5	
					D1-AN-6	
Segundo	Primera	Tres viales	9:00 a.m	Azul	D3-AZ-1	6
					D3-AZ-2	
					D3-AZ-3	
	Segunda	Tres viales	3:00 p.m		D3-AZ-4	
					D3-AZ-5	
					D3-AZ-6	
Tercero	Primera	Tres viales	9:00 a.m	Verde	D3-VD-1	6
					D3-VD-2	
					D3-VD-3	
	Segunda	Tres viales	3:00 p.m		D3-VD-4	
					D3-VD-5	
					D3-VD-6	
Cuarto	Primera	Tres viales	9:00 a.m	Amarillo	D4-AM-1	6
					D4-AM-2	
					D4-AM-3	
	Segunda	Tres viales	3:00 p.m		D4-AM-4	
					D4-AM-5	
					D4-AM-6	
Quinto	Primera	Tres viales	9:00 a.m	Negro	D5-NG-1	6
					D5-NG-2	
					D5-NG-3	
	Segunda	Tres viales	3:00 p.m		D5-NG-4	
					D5-NG-5	
					D5-NG-6	
Sexto	Primera	Tres viales	9:00 a.m	Rojo	D6-RJ-1	6
					D6-RJ-2	
					D6-RJ-3	
	Segunda	Tres viales	3:00 p.m		D6-RJ-4	
					D6-RJ-5	
					D6-RJ-6	
Séptimo	Primera	Tres viales	9:00 a.m	Morado	D7-MR-1	6
					D7-MR-2	
					D7-MR-3	
	segunda	Tres viales	3:00 p.m		D7-MR-4	
					D7-MR-5	
					D7-MR-6	

El procedimiento anterior se realiza para tres niveles de humedad media, alta, baja así como se muestra en el flujo-grama de la Figura 4.21.

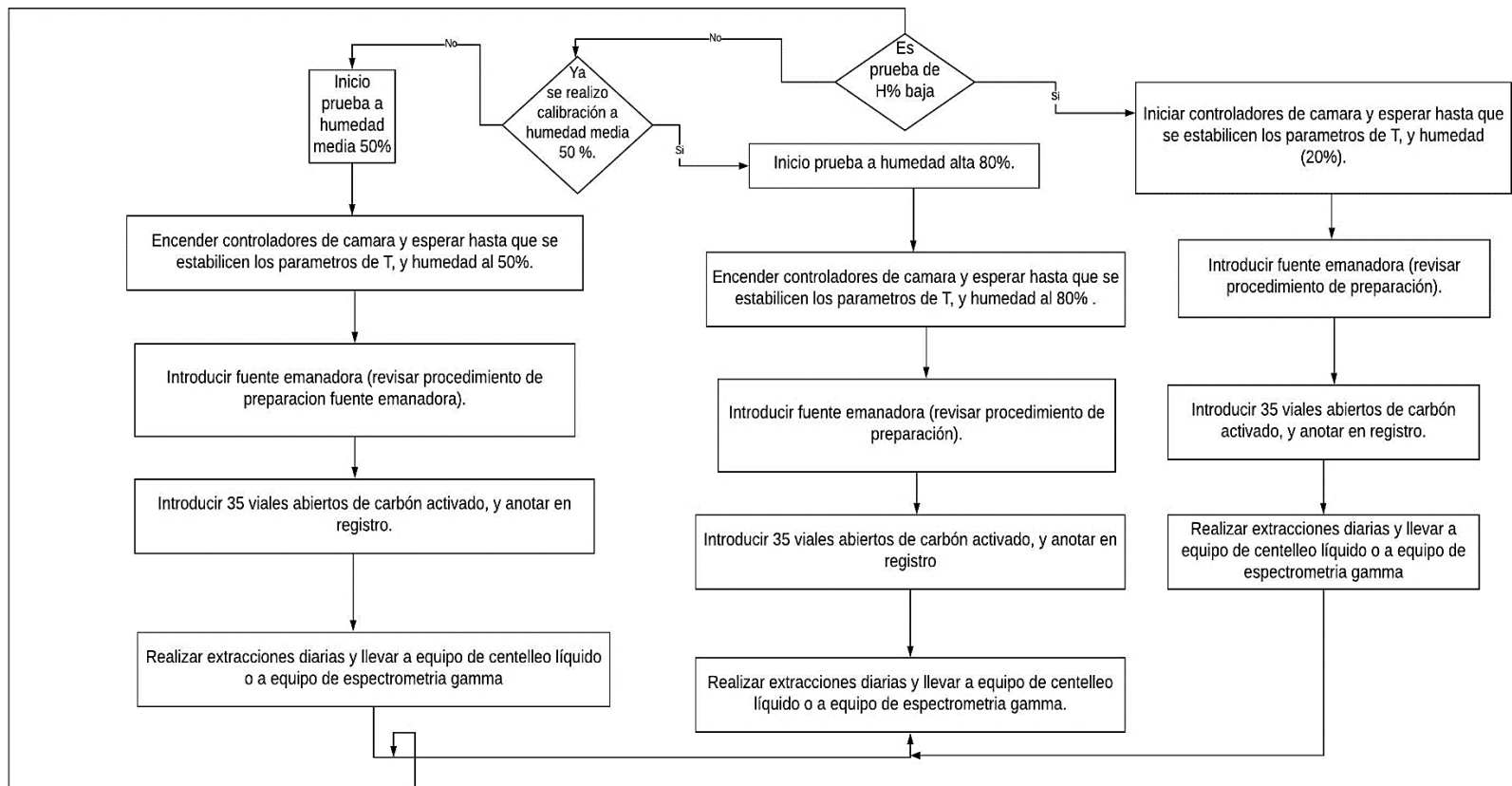


Figura 4.21: Metodología de calibración y determinación de coeficiente de adsorción.

4.4.3 Tratamiento de datos etapa de calibración y determinación de coeficiente de adsorción.

Con los viales extraídos de la cámara, se lee por cada vial en el equipo de centelleo el valor de cuentas por muestra de carbón activado, el equipo da lecturas de cuentas por minutos.

Cuando sean determinadas las cuentas del equipo estas serán utilizadas para calcular el valor de velocidad de exhalación superficial a través de la ecuación propuesta por Johnston & Spehr (1983) a partir de las cuentas netas obtenidas de la medición de carbón activado, esta ecuación es la siguiente.

$$E = \frac{N \cdot t_c \cdot \lambda^2 \cdot \exp(\lambda \cdot t_d)}{\varepsilon \cdot A \cdot [1 - \exp(-\lambda \cdot t_s)] \cdot [1 - \exp(-\lambda \cdot t_c)]} \quad \text{Ec. 4.4}$$

Donde:

E : velocidad de exhalación superficial ($\text{Bq}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$).

N : cuentas netas (cuentas obtenidas durante el tiempo de conteo menos las cuentas del blanco) (s^{-1}).

t_c : periodo de conteo (s).

λ : constante de decaimiento del Rn^{222} (s^{-1}).

t_d : tiempo desde el final de exposición y el inicio de conteo (s).

ε : eficiencia de conteo del detector ($\text{s}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1}$).

A : área de exhalación (m^2).

t_s : periodo de exposición del vial (s).

Una vez conocida la velocidad de exhalación (E), para cada día se puede calcular la concentración teórica de actividad de radón en el aire dentro de la cámara de calibración, con la Ecuación 4.5 que plantea Fuente Lastra (2016).

En esta expresión se desprecia los efectos de ventilación ya que es una cámara hermética.

$$C_{Rn} = (C_0)(e^{-(\lambda)(t_s)}) + \frac{EA}{V\lambda} (1 - e^{-(\lambda)(t_s)}) \quad \text{Ec. 4.5}$$

Donde:

E : velocidad de exhalación superficial ($\text{Bq/m}^2 \cdot \text{s}$)

C_0 : concentración inicial de radón en cámara (Bq/m^3)

A : superficie de exhalación (m^2)

V : volumen del contenedor de acumulación (m^3)

λ : constante de desintegración de radón (s^{-1})

C_{Rn} : concentración en cámara (Bq/m^3)

t : tiempo de exposición en (s)

Debido a que se hacen diariamente dos extracciones, y cada una de ellas por triplicado se debe promediar el triplicado correspondiente a la extracción de las 9:00 a.m y 3:00 p.m. Además de mantener registrada la humedad fijada y el peso del dispositivo antes y después de exposición.

El resumen de procesamiento de datos de la etapa de calibración se registrará según la Tabla 4.16 que se presenta a continuación.

Tabla 4.16: Registro de datos para la calibración de la metodología.

Día de exposición	Código de dispositivo de medición	ts (s)	td (s)	tc (s)	Conteo blanco (CPM)	Conteo del dispositivo (CPM)	pa (g)	pd (g)	Δp
Primero									
Segundo									
Tercero									
Cuarto									
Quinto									
Sexto									
Séptimo									

La tabla anterior es completada cuando se realiza a una humedad fija. Como se ejecutará a tres valores de humedad, se obtendrían tres tablas de datos: para 20%, 50% y 80% de humedad. A continuación, se muestra la Tabla 4.17 que es una tabla resumen de datos ya considerando los datos promediados de diferencias de peso y conteos por segundo (cps), para las tres humedades también se agrega el valor reportado por el equipo auxiliar de medición de actividad de radón (Corentium).

Tabla 4.17: Registro de datos para valores promediados de cada extracción diaria de dispositivos de muestreo.

Día de exposición	Extracción Diaria	Promedio Cuentas netas (N) para 20% H (en cámara)	Concentración con Corentium 20 % H Bq/L (de cámara)	Concentración teórica Co 20% humedad	Promedio Cuentas (N) netas para 40% H (en cámara)	Concentración con Corentium 40 % H Bq/L (de cámara)	Concentración teórica Co 40 % humedad	Promedio Cuentas (N) netas para 80% H (en cámara)	con Corentium 80 % H Bq/L (de cámara)	Concentración teórica Co 40 % humedad
1	Primera									
	Segunda									
2	Primera									
	Segunda									
3	Primera									
	Segunda									
4	Primera									
	Segunda									
5	Primera									
	Segunda									
6	Primera									
	Segunda									
7	Primera									
	Segunda									

Con los datos registrados y procesados se generan gráficos y tendencias de relación entre las variables de interés.

4.4.4 Gráficos generados con los datos y cálculos de la calibración.

A. Gráficos Cuentas netas (N) versus tiempo de exposición (t)

Se encontrará la tendencia de cuentas (N) respecto al tiempo de exposición, y se espera que crezca respecto a mayor tiempo de exposición de los dispositivos según proyecciones de datos de prueba piloto (Tabla 5.1). En el proceso de calibración se generan tres tendencias correspondientes a las tres pruebas con humedad relativa diferente, en la Figura 4.22 se presenta la tendencia de las cuentas netas con respecto al tiempo para la prueba piloto realizada por los asesores del CIAN.

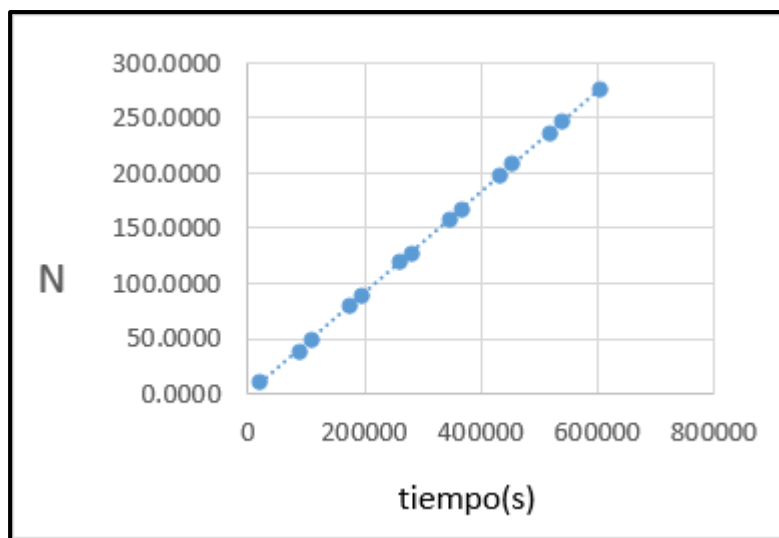


Figura 4.22: Cuentas netas (N) vrs tiempo de exposición (tiempo).

B. Gráficos exhalación (E) versus tiempo de exposición (t)

Con los valores y tendencias correspondientes a las cuentas netas se deberán establecer de manera gráfica datos que relacionen la velocidad de exhalación superficial en función del tiempo. Se espera que, en este caso, la exhalación superficial de radón aumente a mayor tiempo de exposición, pero debido a la acumulación de radón

en la cámara, se puede llegar a un punto donde la exhalación (E) se estabilice o incluso descienda, debido a que las mismas partículas en el ambiente de la cámara y alta concentración de radón bloqueen la transferencia de radón desde la superficie de la fuente emanadora. Como ejemplo del comportamiento esperado se muestran los valores del estudio de Fuente Lastra (2016) (véase la Tabla 4.18) donde se presentan mediciones de exhalación dentro de una cámara de calibración con exposición a una fuente emanadora.

Tabla 4.18: Datos obtenidos de tiempo de exposición (t) y exhalación (E) en cámara de calibración.

	N (cuentas netas)	Δm	t_c (min)	E (Bq/m²h)
Cámara de calibración	12199 ± 144	0.10	765	2201 ± 149
	10909 ± 139	0.10	775	1971 ± 135
	11159 ± 140	0.09	785	2017 ± 138
	11589 ± 142	0.08	795	2097 ± 143
	10749 ± 139	0.07	805	1946 ± 133

Fuente: (Fuente Lastra, 2016).

C. Gráficos de concentración en el aire al interior de la cámara (C_{Rn}) versus tiempo de exposición (t)

Estos gráficos presentan el valor de la concentración de radón en el aire de la cámara respecto del tiempo de exposición, y se generan a partir de:

- a. Valores de C_{Rn} Teóricos de la Ecuación 4.5.
- b. Valores de C_{Rn} leídos de equipo Airthings Corentium.

Estos con el objetivo de comparar las tendencias entre un equipo y el valor teórico esperado. Se espera que la tendencia sea de incremento respecto al tiempo, y se

verifique un comportamiento aproximadamente lineal, y al incrementar el tiempo de exposición se espera que la concentración tienda a ser constante. Como ejemplo y para fines de comparación, en la Figura 4.23 se muestra una tendencia de la concentración de radón respecto al tiempo detectado a partir del Equipo Radón Scout obtenida según antecedentes presentados en la bibliografía consultada (Fuente Lastra, 2016).

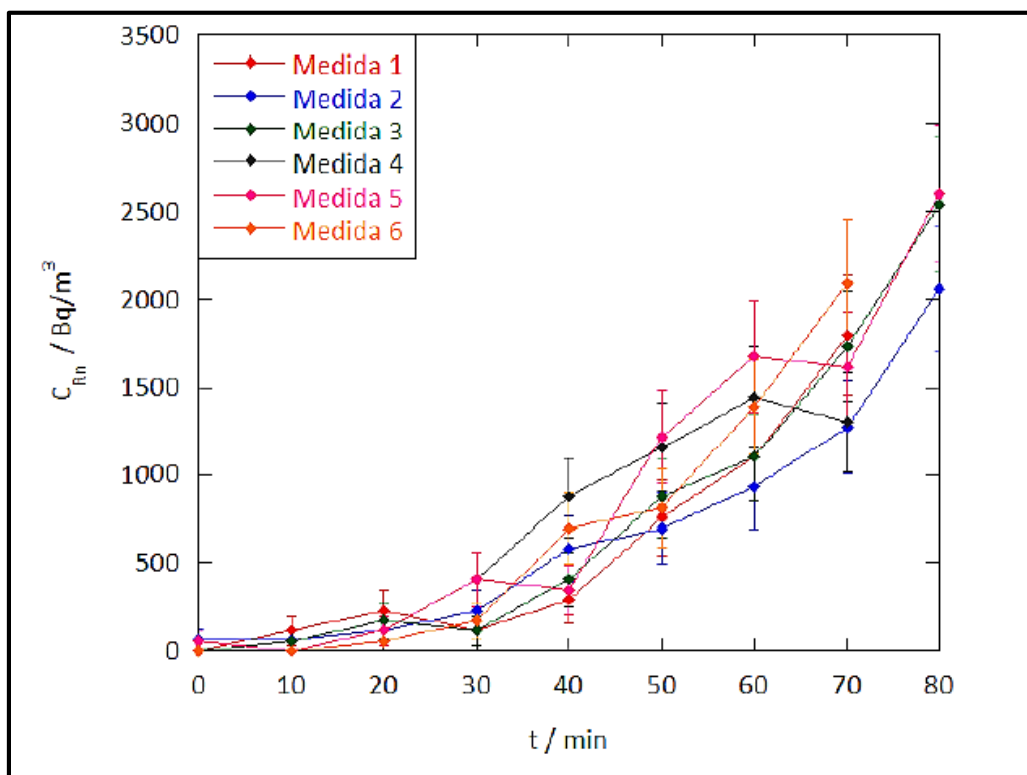


Figura 4.23: Representación gráfica del aumento de la concentración en el aire al interior de la cámara (C_{Rn}) vrs tiempo de exposición (t). Fuente: (Fuente Lastra, 2016).

Como se puede visualizar en el gráfico anterior, existen pequeñas disminuciones del valor de concentración lo cual podría deberse a la ventilación de la cámara, por la apertura para el retiro de viales.

4.4.5 Determinación del factor de calibración (CF).

Luego se realizará un análisis para los valores del factor de calibración (CF), ya que estos varían según el nivel de humedad presente y su determinación es el principal objetivo de la calibración. Con estas determinaciones de valores puntuales del factor de calibración (CF), para la variación de diferencia de pesos en viales y su comportamiento con respecto al tiempo de exposición (t), se genera una de base de datos de manera gráfica, la cual servirá para la lectura del factor de calibración (CF) adecuado cuando se realicen las pruebas en el lugar de interés del muestreo. Para el cálculo del factor de calibración (CF) se utilizará la Ecuación 4.6 con base a la Guía de la EPA 520/5-87-005, por otro lado en la Ecuación 4.7 se presenta la forma de cálculo de la eficiencia del equipo de lectura de las concentraciones de radón.

$$CF = \frac{N}{t_s * \varepsilon * C_{Rn} * DF} \quad \text{Ec. 4.6}$$

Donde:

CF: factor de calibración (m³/s).

N: cuentas netas (cps).

t_s: tiempo de exposición del vial (s).

ε: eficiencia del equipo de lectura de gas radón (cps/Bq), utilizando la Ecuación 4.7:

$$\varepsilon = \frac{\frac{\text{cps patrón} - \text{cps blanco}}{\text{tiempo de contaje}}}{\text{actividad de patrón}} \quad \text{Ec. 4.7}$$

C_{Rn} : concentración de radón durante el periodo de exposición (Bq/m^3).

DF : factor de decaimiento, que se encuentra con la Ecuación 4.8.

$$D_F = e^{-\frac{\ln(2) t_D}{t_{1/2}}} \quad \text{Ec. 4.8}$$

t_D : tiempo desde la mitad del período de exposición hasta el inicio de conteo (s).

$t_{1/2}$: vida media del Rn^{222} (s).

Como se puede valorar en la Guía EPA 520/5-87-005, un ejemplo de esta tendencia del factor de calibración (CF), para dos días de exposición de los dispositivos se presenta en la Figura 4.24, además en la Figura 4.25 se presentan curvas de calibración según un estudio realizado por el autor Phillip en el año 2002.

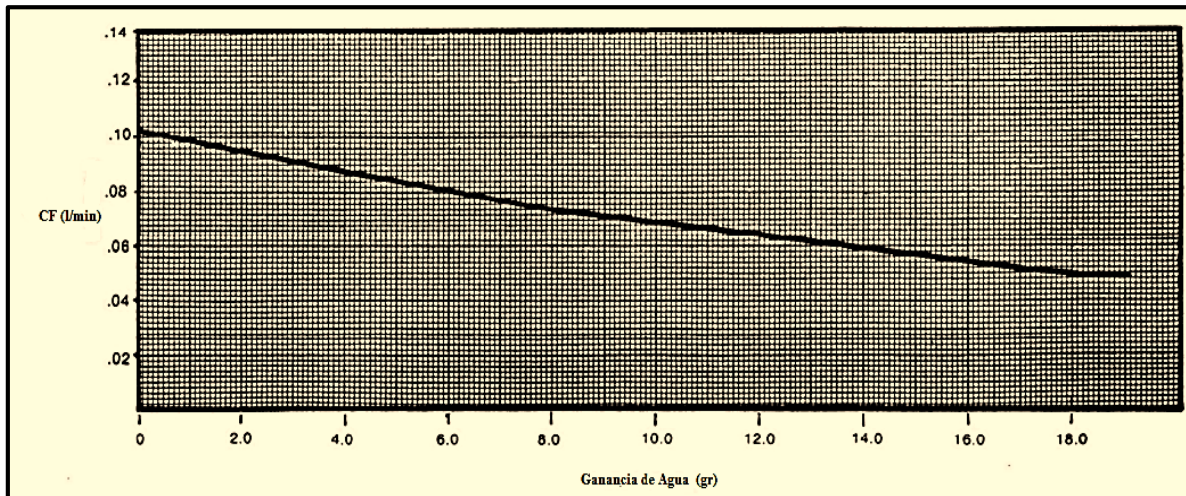


Figura 4.24: Ganancia de agua versus factor de calibración para dos días de exposición. Fuente: (EPA, 1987).

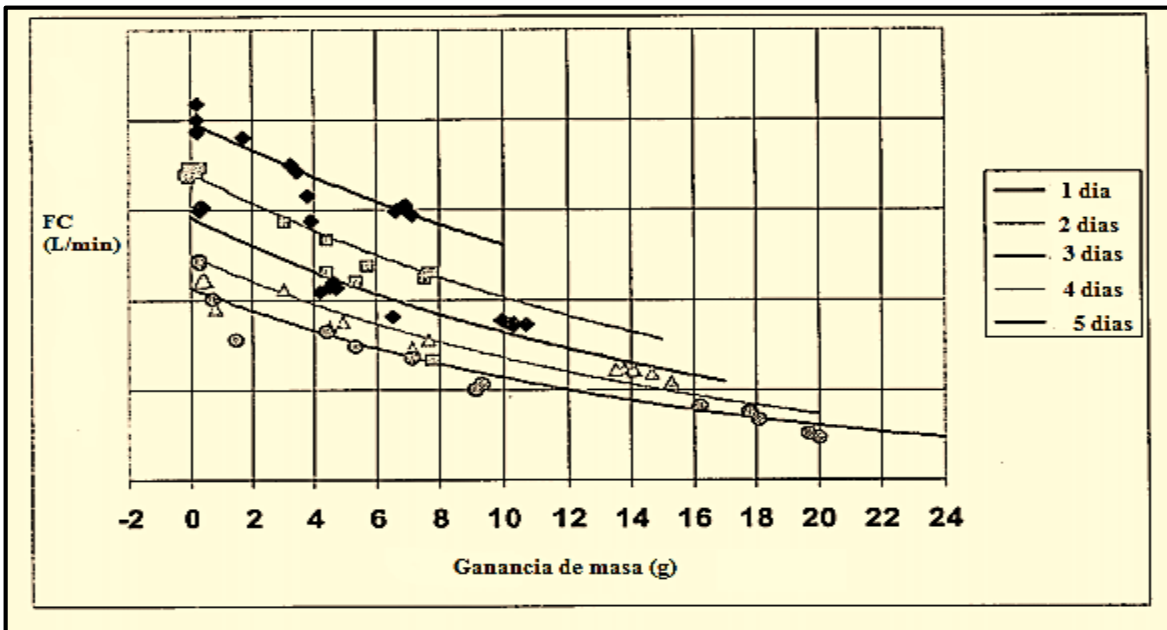


Figura 4.25: Curvas de calibración para cánister reciclados usando modelos no lineales. Fuente: (Phillip, 2002).

Es importante revisar las tendencias previamente generadas en estudios previos para compararlos con los generados por la metodología propuesta para su aplicación en el CIAN y realizar el análisis respectivo. En la propuesta desarrollada los días de exposición son siete, por lo que las curvas deberán ser generadas para cada día de extracción y tener valores del *CF*.

4.4.6 Determinación de coeficiente de adsorción.

Si se conoce la concentración de radón en la cámara de calibración para distintos tiempos y además se conoce la actividad de radón adsorbida por unidad de masa de carbón, se puede calcular la capacidad del carbón activado para retener moléculas de carbón mediante la Ecuación 4.9, graficando posteriormente este coeficiente vrs el tiempo, para observar la tendencia de dicho parámetro que determina la efectividad del dispositivo de medición.

$$K(t) = \frac{Q(t)}{Ca} \quad \text{Ec. 4.9}$$

Donde:

$k(t)$: constante de adsorción (m^3/kg)

$Q(t)$: actividad de Rn^{222} adsorbida por unidad de masa de carbón (Bq/kg)

Ca : concentración de Rn^{222} en la cámara de referencia (Bq/m^3)

4.4.7 Error 2 sigma (2σ) en el conteo.

Este representa el error en las mediciones en los dispositivos de muestreo expuestos para cada uno de los estudios, en la Ecuación 4.10 se presenta la forma de cálculo.

$$\%2\sigma \text{ error} = 2 * \frac{\sqrt{RCN+RCF}}{RCN-RCF} * 100\% \quad \text{Ec. 4.10}$$

Donde:

RCN : recuento de cuentas netas.

RCF : recuento de cuentas de fondo

Por lo tanto, la concentración de radón de la muestra será:

$$C_{Rn} \pm 2\sigma \text{ error } \% \quad \text{Ec. 4.11}$$

4.5 POSIBLES LIMITACIONES DE LA METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN.

La metodología de calibración pudiese desarrollarse como un acercamiento inicial, esto en caso de no contar con algunos de los equipos o materiales proyectados. Según las situaciones siguientes:

- a) No exista disponibilidad de sensores y controles de humedad: Realizando pruebas en la cámara de acrílico, y al no tener los sensores disponibles se pudiese incrementar el contenido de silica gel ya que es mejor la eficiencia del método a bajas humedades, por lo que se intentaría tener los niveles más bajos posibles y así centrarse en los resultados posibles a condiciones óptimas, además se toma en cuenta que el vial base de Canoba y López está diseñado para que adsorba la humedad antes de que el aire en la cámara entre en contacto con el carbón activado a través de una capa de silica gel.
- b) No exista dispositivos de lectura y control de temperatura: Como sustitutos de los sensores de temperatura electrónicos, se puede utilizar termómetros de aceite. Además de asumir que la temperatura en el laboratorio del CIAN se mantiene relativamente estable por el aire acondicionado de las instalaciones y como consideración adicional estas calibraciones se realizan como procesos isotérmicos a temperaturas ambientes, por lo que no existe un mayor interés en elevar tanto la temperatura en la cámara (aunque esto será según la necesidad del caso en estudio).
- c) No se cuenta con equipo de medición de concentraciones de radón: para esta situación se propone que la fuente emanadora sea la roca con contenido de uranio (en lugar de la tierra impregnada), ya que de esta se posee un estimado del valor de concentración de emanación de radón, este valor incluye el efecto de transporte de equipo de medición de concentración de radón.

Además, los resultados obtenidos de adsorción de radón para cada día de medición de los siete en total darían una aproximación de los resultados y la repetición de experimentos para comprobación de los resultados y su tratamiento estadísticos. En caso de no poder construirse la cámara de acrílico se puede sustituir por un recipiente de plástico comercial, y como control de temperatura únicamente el termómetro.

4.5.1 Calibración del método y determinación del coeficiente de adsorción del gas radón en carbón activado (metodología como solución de posibles limitantes).

En esta alternativa se plantea realizar pruebas de adsorción a la menor humedad a través de la colocación de una cantidad mayor de silica gel en cámara y con una fuente emanadora conocida.

Para simular ambientes con humedad media y alta, se propone pre-humidificar el carbón activado y tener como parámetro la diferencia de peso antes y después del proceso de pre-humidificación del carbón, y luego exponerlo en un ambiente con radón producido por una fuente emanadora conocida. Este proceso se resume en el esquema de la Figura 4.26 y se aborda con detalle en las siguientes secciones.

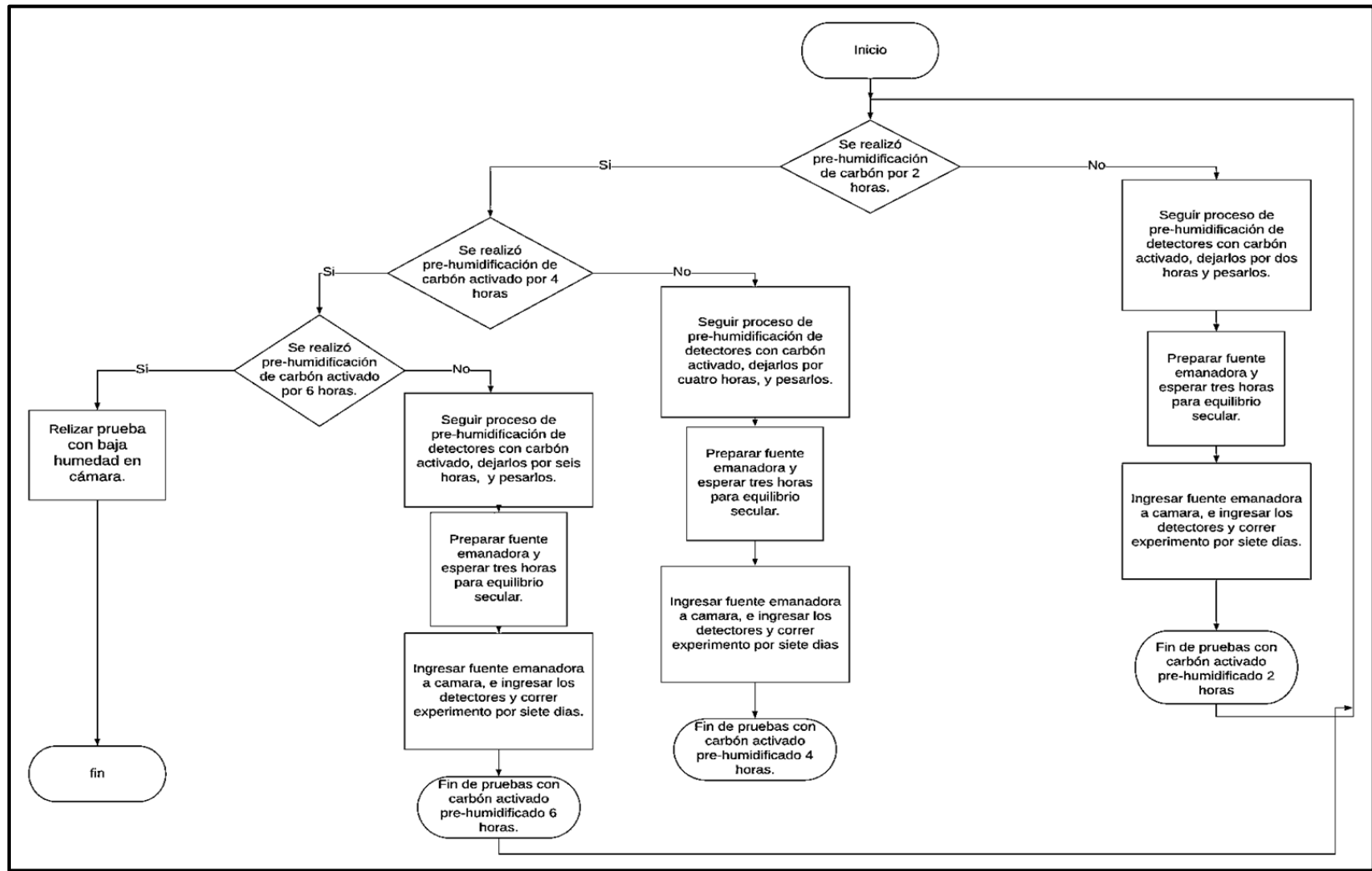


Figura 4.26: Diagrama de metodología de calibración como solución a posibles limitantes

4.5.1.1 Equipos y materiales.

- a. Cámara de acrílico de 1 m³
- b. Termómetro
- c. Fuente emanadora
- d. Vial con silica gel, membrana y carbón activado
- e. Cronómetros
- f. Hojas de registro

4.5.1.2 Prueba con carbón activado previamente humidificado en viales (detectores).

Este procedimiento se realiza tres veces para: dos horas, cuatro horas y seis horas, según el nivel de humidificación que se necesita, el procedimiento consta de los siguientes pasos:

Paso 1: Preparación de los detectores (véase la sección 4.3.2.1, B) se omitirá el último paso (no colocar silica gel).

Paso 2: Etiquetado de viales

Se prepararán en total 21 viales con carbón activado, con las etiquetas que se describen adelante:

- i. Color: indica la cantidad de días en exposición en cámara con fuente emanadora de radón
- ii. Numero: indica las cantidades de tiempo de exposición (horas) en ambiente humidificado sin radón
- iii. Letra: indica correlativo de repetición de la prueba (las pruebas se realizan con triplicado de muestra, la letra puede ser A, B, C). Las etiquetas de viales serán:

Para 2 horas de exposición a humedad sin radón las etiquetas son:

Tabla 4.19: Etiquetas para pre-humidificación de viales durante dos horas

2A	2A	2A	2A	2A	2A	2A
2B	2B	2B	2B	2B	2B	2B
2C	2C	2C	2C	2C	2C	2C

Para 4 horas de exposición a humedad sin presencia de radón las etiquetas son:

Tabla 4.20: Etiquetas para pre-humidificación de viales durante cuatro horas

4A	4A	4A	4A	4A	4A	4A
4B	4B	4B	4B	4B	4B	4B
4C	4C	4C	4C	4C	4C	4C

Para 6 horas de exposición a humedad sin presencia de radón las etiquetas son:

Tabla 4.21: Etiquetas para pre-humidificación de viales durante seis horas

6A	6A	6A	6A	6A	6A	6A
6B	6B	6B	6B	6B	6B	6B
6C	6C	6C	6C	6C	6C	6C

Además de las etiquetas con colores se pondrá un código a cada vial, los cuales se detallan en la Tabla 4.22.

Paso 3: Pesar viales cerrados preparados y etiquetados, registrar peso en fichas de registro.

Paso 4: Preparación de la cámara: Revisar que cada componente de la cámara este en buen estado y limpiar el interior con un paño. En este caso adaptar manguera desde erlenmeyer (con agua en hot plate para generar vapor), hasta la cámara de acrílico, según el esquema de la Figura 4.27.

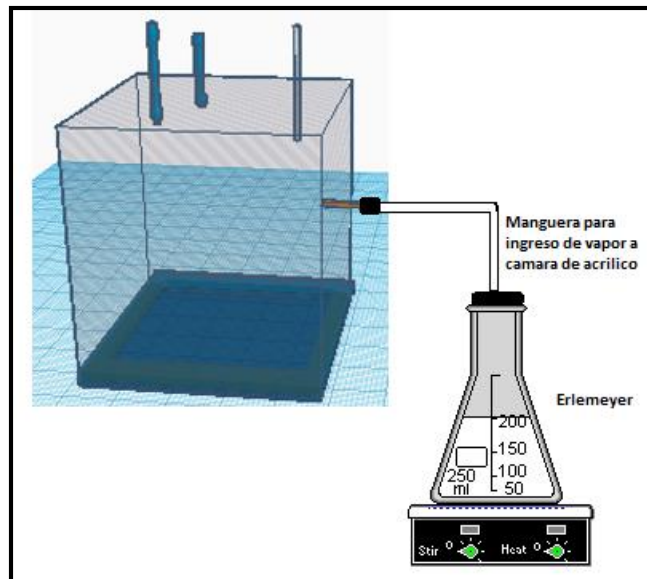


Figura 4.27: Diagrama de sistema de humidificación.

Paso 5: Esperar hasta que el flujo de vapor sea constante desde el erlenmeyer y supervisar si se termina el agua en el sistema por evaporación, calentar en otro erlenmeyer para agregar agua precalentada y evitar interrupciones en el flujo de vapor.

Paso 6: Una vez estabilizado el flujo de vapor destapar los 21 viales e introducirlos a la cámara al mismo tiempo, para pre-humidificación del carbón en ausencia de radón. Anotar hora de ingreso en fichas de registro.

Paso 7: Realizar las extracciones de viales cuando se cumpla el tiempo de humidificación al que corresponda la prueba (2 horas, 4 horas y 6 horas).

Paso 8: Pesar los 21 viales posteriores a humidificación y anotar en fichas de registro.

Paso 9: Preparación de la fuente emanadora (ver sección 4.3.3.2, A, I). Revisar el procedimiento y colocarla en cámara, esperar tres horas para lograr equilibrio secular.

Paso 10: Abrir los 21 viales pre-humidificados e ingresar a cámara junto con fuente emanadora de radón.

Paso 11: Correr prueba por siete días y realizar extracciones de 3 viales diarios (véase la Tabla 4.22).

Tabla 4.22: Forma de extracción de viales en prueba con radón en metodología como propuesta a posibles limitaciones.

Día de exposición	Forma de muestreo	Total de viales diarios		Color de etiqueta según día de extracción			Código		
				A	B	C			
Primero	Realizar una extracción de tres viales	3		A	B	C	Anaranjado	D1-AN-#	
Segundo	Realizar una extracción de tres viales	3		A	B	C	Azul	D2-AZ-#	
Tercero	Realizar una extracción de tres viales	3		A	B	C	Verde	D3-VD-#	
Cuarto	Realizar una extracción de tres viales	3		A	B	C	Amarillo	D4-AM-#	
Quinto	Realizar una extracción de tres viales	3		A	B	C	Negro	D5-NG-#	
Sexto	Realizar una extracción de tres viales	3		A	B	C	Rojo	D6-RJ-#	
Séptimo	Realizar extracción de cinco viales	3		A	B	C	Morado	D7-MR-#	
		Total de viales	21						

Paso 12: Pesar los viales y registrar hora de extracción.

Paso 13: Realizar conteo en equipo de centelleo líquido o en equipo de espectrometría gamma.

4.5.1.3 Prueba con baja humedad en cámara.

Se realiza una prueba sin pre-humidificación del carbón activado, y con la mayor cantidad posible de silica gel en cámara:

1. Preparación de la cámara: revisar que cada componente de la cámara este en buen estado y limpiar el interior con un paño. Agregar la silica gel que sea necesaria para minimizar contenido de humedad en cámara.
2. Preparación de la fuente emanadora.
3. Preparación de los detectores (revisar el procedimiento de preparación de los viales en la sección 4.3.2.1, B).
4. Colocar más recipientes y torres de silica gel en los laterales de la cámara.
5. Ingresar fuente emanadora de radón previamente preparada.
6. Esperar 3 horas para que se alcance el equilibrio secular.
7. Ingresar los 21 viales abiertos.
8. Extraer diariamente tres viales por siete días (tomar en cuenta los colores, letras del etiquetado y código).
9. Llevar a equipo de centelleo líquido o a equipo de espectrometría gamma.
10. Registrar en hojas de datos los resultados del conteo.

El conteo de la actividad de radón se puede realizar con dos técnicas las cuales son la técnica de centelleo líquido y la técnica de espectrometría gamma. El procedimiento para mediciones con centelleo líquido se especifica a continuación y el procedimiento para mediciones con espectrometría gamma se describe en la sección subsecuente.

4.6 PROCEDIMIENTO DE CONTEO EN EL EQUIPO DE CENTELLEO LÍQUIDO.

Paso previo al procedimiento: Preparación del coctel de centelleo.

Se disuelven 5.0 g del soluto primario PPO (2,5 difenil oxazol) y 0.05 g del secundario POPOP (1-4 bis 2-(5 feniloxazolil) benceno) por 1000 mL de tolueno (véase la Figura 4.28). Todos grados centelleo.

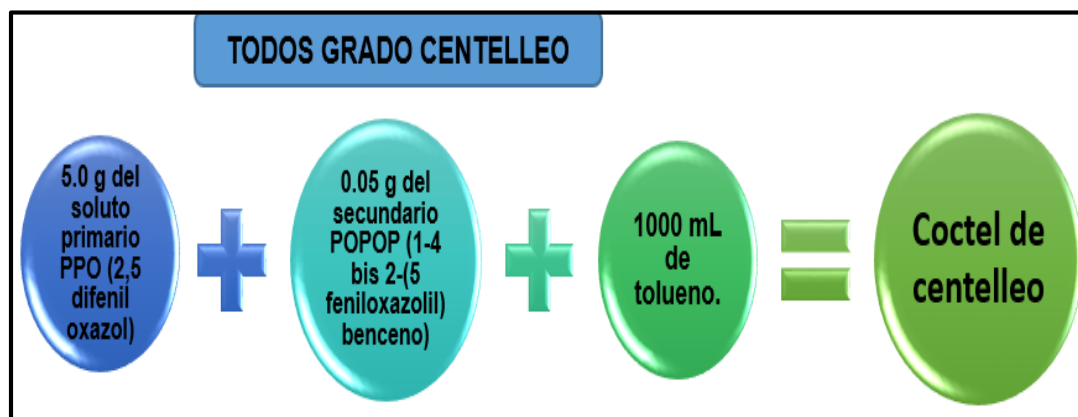


Figura 4.28: Preparación coctel de centelleo líquido.

Si alguno de los viales presenta fractura previa al conteo en el equipo de centelleo como la mostrada en la Figura 4.29, se deberá llenar la hoja de registro con las respectivas observaciones y descartar el vial para su conteo, posteriormente este vial

descartado se considerará para los cálculos del promedio de viales retirados ese día.



Figura 4.29: Posibles fracturas que podría presentar el vial posterior al muestreo.

Paso 1: Retirar la silica gel y la barrera difusa del vial.

Paso 2: Agregar 10 mL de solución centelladora en el vial, con la ayuda de una pipeta volumétrica.

Paso 3: Colocar cinta teflón alrededor de la boquilla del vial para tener un cierre hermético.

Paso 4: Agitar vigorosamente el vial para favorecer la desorción del radón desde el carbón activado, 2 minutos de agitación manual es suficiente.

Paso 5: Limpiar la superficie exterior del vial con un paño impregnado de alcohol.

Paso 6: Centrifugar el vial durante 5 minutos a 2000 rpm en un centrifuga de laboratorio.

Paso 7: Colocar el vial dentro del casete del equipo de centelleo líquido y dejar reposar durante 3 horas en un ambiente oscuro, a partir del agregado de la solución centelladora para alcanzar el equilibrio secular de radón y su progenie.

Paso 8: Medir la actividad de radón en un equipo de centelleo líquido. Para mediciones realizadas en el CIAN-FIA-UES se utilizará el equipo de centello TRI-CARB 2100 PACKARD aplicando el protocolo de tiempo de medición de cada vial de 60 min, 1 ciclo y para la ventana de medición: abierta completamente contando en todo el espectro (0 - 2000 KeV).

Paso 9: Observar las líneas espectrales y registrar los resultados obtenidos en la hoja de datos. Como referencia las líneas espectrales para el radón y sus descendientes se muestran en la Figura 4.30, cabe recalcar que el siguiente espectro se obtuvo del análisis de una muestra de radón en agua. Dicho espectro servirá únicamente como referencia y cabe recalcar que el espectro que se obtenga de una muestra de radón en carbón activado pudiera variar ligeramente.

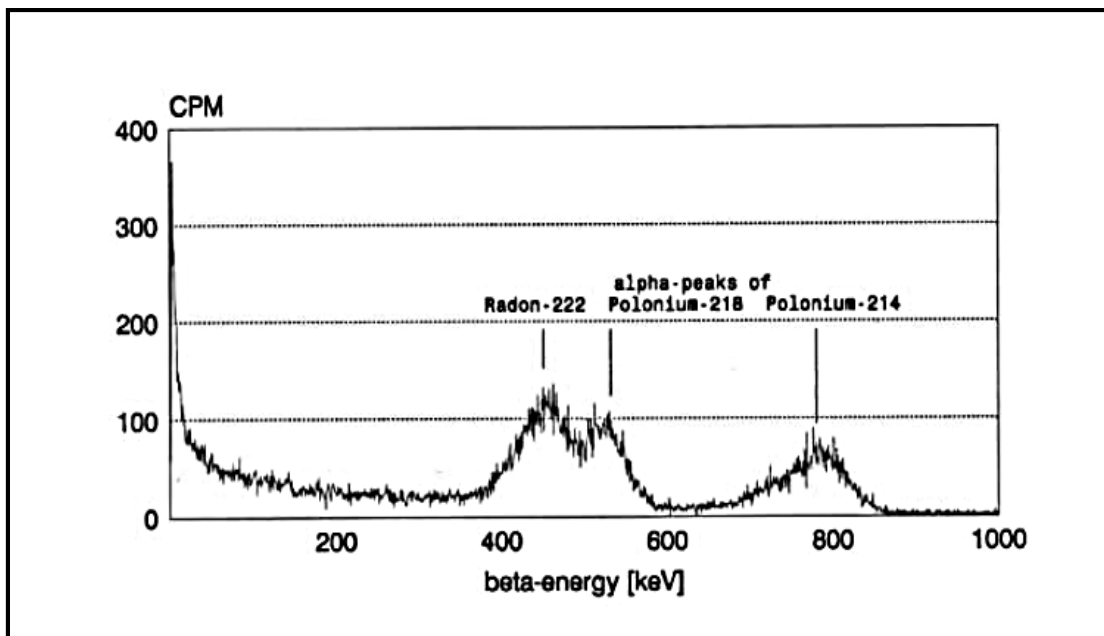


Figura 4.30: Espectro de los productos de decaimiento del radio (Ra^{226}) obtenidos mediante la técnica de centelleo líquido. Fuente: (Kappel, Keller, Kreienbrock & Nickels, 1992).

4.7 PROCEDIMIENTO DE MUESTREO DE RADÓN EN AIRE EN LUGARES DE TRABAJO O VIVIENDAS.

4.7.1 Consideraciones previas al muestreo.

En los edificios multiniveles (apartamentos multifamiliares, hospitales, escuelas, universidades, edificios estatales y centros de negocios) la fuente principal de radón es el terreno, siendo mayor la exhalación en zonas graníticas y arcillosas muy fracturadas, por lo cual las concentraciones de radón son más altas en sótanos, plantas bajas y pisos inferiores. Con base en lo anterior se recomienda realizar las medidas en las dos plantas inferiores ocupadas por trabajadores, colocando los dispositivos de muestreo según la Tabla 4.23.

Tabla 4.23: Cantidad de dispositivos de muestreo recomendados para los estudios de exposición al radón en edificios multiniveles y viviendas de un solo piso.

Lugar de trabajo	Número de dispositivos
Oficinas compartimentadas en recintos de menos de 150 m ²	Un dispositivo por recinto
Áreas de hasta 1000 m ² (oficinas de planta abierta, superficies de atención al público y almacenes), en planta baja, en contacto con el terreno.	Un dispositivo por cada 150 m ²
Áreas de hasta 1000 m ² (oficinas de planta abierta, superficies de atención al público y almacenes) en primera planta o superiores	Un dispositivo por cada 250 m ²

Continua...

Tabla 4.23: Cantidad de dispositivos de muestreo recomendados para los estudios de exposición al radón en edificios multiniveles y viviendas de un solo piso (Continuación).

Lugar de trabajo	Número de dispositivos
Áreas de hasta 5000 m ² , en planta baja, en contacto con el terreno.	Un dispositivo por cada 400 m ²
Áreas de hasta 5000 m ² , en primera planta o superiores.	Un dispositivo por cada 500 m ²
Áreas muy extensas (varios miles de m ²), en planta baja, en contacto con el terreno.	Un dispositivo por cada 500 m ²
Áreas muy extensas (varios miles de m ²), en primera planta o superiores.	Un dispositivo por cada 750 m ²

Fuente: (CSN, 2012).

Cuando las medidas efectuadas en los pisos inferiores superen los niveles máximos permisibles se recomienda medir los pisos superiores, que en ocasiones por efecto chimenea pueden registrarse valores de radón elevados.

Los puntos donde se coloquen los dispositivos deben ser representativos al espacio de trabajo, se recomienda colocarlos a una altura del suelo de entre 50 y 180 cm y a una distancia de 30 cm de la pared (véase la Figura 4.31), no se deben colocar en el interior de elementos cerrados como armarios, ni próximos a corrientes de aire (ventanas, ventiladores, etc.), ni a fuentes de calor (radiadores, televisores, otros aparatos eléctricos), deben evitarse aquellos lugares donde la humedad puede ser elevada, como cocinas, lavaderos o cuartos de baño.

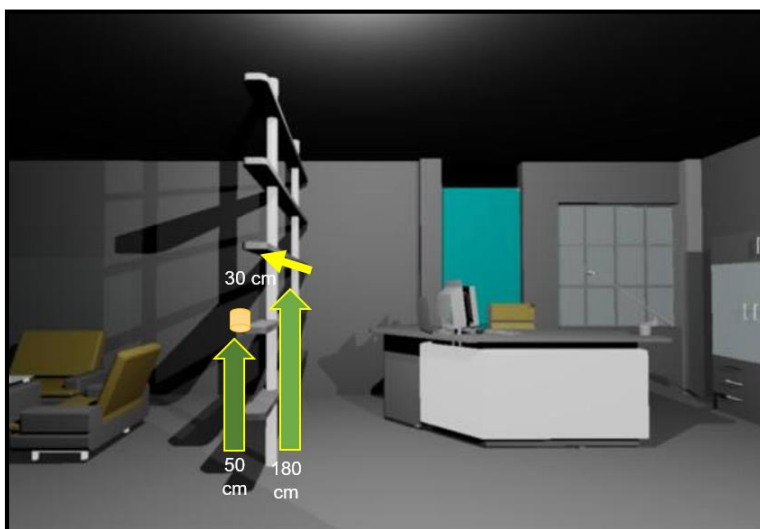


Figura 4.31: Distribución recomendada del dispositivo en el punto de muestreo.
Fuente: (PLANOSPORA, s.f).

En el caso de realizar mediciones en viviendas de un solo piso, se debe colocar un detector por cada habitación manteniendo las condiciones de la vivienda de uso normal es decir siguiendo los hábitos comunes de ocupación y la colocación de los detectores es la misma que en los edificios, además en ambos casos es necesario cerrar la mayor cantidad de ventanas y puertas posibles durante el tiempo que se realice el muestreo; por otra parte los sistemas de aire acondicionado y calefacción si existieran pueden permanecer en uso.

4.7.2 Muestreo de radón en aire en lugares de trabajo o viviendas.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores se procede a realizar el muestreo de la siguiente manera:

Paso 1: Se prepara el dispositivo según la forma descrita en la sección 4.3.2.1, B.

Paso 2: Se coloca una etiqueta para identificar el vial o dispositivo de muestreo, en la Figura 4.32 se presenta un ejemplo de etiqueta para muestreo de radón en viviendas o lugares de trabajo.

NUMERO DE VIAL: _____
FECHA DE INICIO DE MUESTREO: _____
FECHA DE FINALIZACIÓN DE MUESTREO: _____
HORA DE INICIO DE MUESTREO: _____
HORA DE FINALIZACIÓN DE MUESTREO: _____
LUGAR DE MUESTREO: _____
NOMBRE DEL MUESTREADOR: _____

Figura 4.32: Ejemplo de etiqueta para muestreo de radón en viviendas o lugares de trabajo.

Paso 3: Pesar el dispositivo en balanza grado analítico.

Paso 4: Anotar su masa inicial.

Paso 5: Trasladar el dispositivo al lugar de interés (edificio multinivel o vivienda), asegurándose de mantener su hermeticidad durante el transporte.

Paso 6: Colocar número de dispositivos según lo recomendado en la Tabla 4.23.

Paso 7: Colocar cada dispositivo a una altura del suelo de entre unos 50 y 180 cm y a una distancia de 30 cm de la pared más cercana.

Paso 8: Llenar la hoja de datos para mediciones de radón en viviendas o lugares de trabajo, con los datos que se conozcan en el inicio del muestreo.

Paso 9: Abrir el dispositivo para su exposición, y anotar la fecha y hora de su apertura en la etiqueta.

Paso 10: Dejar los dispositivos en exposición por un tiempo de 7 días.

Paso 11: Completado el tiempo de exposición, cerrar y terminar de llenar la hoja de datos. En la parte de observaciones se debe registrar las condiciones de humedad, en caso de que se hayan medido diariamente durante el muestreo.

Paso 12: Por ultimo transportar el dispositivo desde el lugar de medición hasta el laboratorio asegurando la hermeticidad en todo momento.

Paso 13: Realizar conteo de radón en el equipo de centelleo liquido o en equipo de espectrometría gamma.

4.8 PROCEDIMIENTO DE MUESTREO DE RADÓN EN AIRE EN ESTUDIOS AMBIENTALES.

Paso 1: Para realizar el muestreo se escogen los días con condiciones meteorológicas favorables (poca humedad), y de preferencia en la estación de verano (noviembre-abril), durante esta época las lluvias que se registran son casi nulas y solo suceden raramente en las zonas montañosas del país, por lo cual la humedad presente en el ambiente será poca y no interferirá en el proceso de adsorción del gas radón en el carbón activado.

Paso 2: El terreno donde se colocarán los dispositivos debe estar libre de vegetación y sin residuos.

Paso 3: Se preparan los dispositivos según la forma descrita en la sección 4.3.2.1, B Una modificación importante es la cantidad de carbón activo del dispositivo de muestreo como se aprecia en el apartado referido, ya que la prueba piloto realizada por los asesores del CIAN, evidencia que una cantidad pequeña de carbón activado no es sensible a adsorber radón (Rn^{222}) para este tipo de estudios.

Paso 4: Se coloca una etiqueta para identificar cada vial (véase la Figura 4.32)

Paso 5: Se pesa cada dispositivo en una balanza analítica.

Paso 6: Se anota su masa inicial.

Paso 7: Se trasladan los dispositivos al lugar de interés.

Paso 8: Colocar un dispositivo por cada 50 m² de superficie y en lugares estratégicos a manera de cubrir el mayor terreno posible. Llenar la hoja de datos para mediciones de radón en estudios ambientales, con los datos que se conozcan en el inicio del muestreo.

Paso 9: Destapar los dispositivos exponiendo el carbón activado al aire por 1 minuto.

Paso 10: Pasado el tiempo de exposición se cubre cada dispositivo con un recipiente de plástico impermeable al radón tipo domo, en la Figura 4.33 se presenta un ejemplo del tipo de recipiente que se puede utilizar. Este domo debe incluir sistema de estacas para sujetar el domo al suelo.



Figura 4.33: Recipiente en forma de domo impermeable al radón. Fuente: (freepik, s.f)

Paso 11: Los recipientes con los dispositivos se dejan midiendo durante 7 días.

Paso 12: Completado el tiempo de exposición, quitar el recipiente a cada dispositivo y cerrar, además de terminar de llenar la hoja de datos.

Paso 13: Por último transportar los dispositivos desde el lugar de medición hasta el laboratorio asegurando la hermeticidad en todo momento.

Paso 14: Realizar conteo de radón en el equipo de centelleo líquido o en equipo de espectrometría gamma.

El personal encargado de realizar el muestreo de gas radón en espacios cerrados y estudios ambientales debe utilizar el equipo de protección personal descrito en el Anexo 6 durante el transcurso de estas actividades.

4.9 PROTOCOLO DE RETIRADA Y TRANSPORTE DE LOS DISPOSITIVOS.

Transcurridos los 7 días desde su instalación, se procederá a la retirada de los dispositivos, su empaquetamiento con una funda plástica transparente en caja con es-

ponja (véase la Figura 4.34) y envíe en el menor tiempo posible al laboratorio para su análisis.



Figura 4.34: Ejemplo de caja para transporte de muestras hacia laboratorio. Fuente: (akralab, s.f)

4.10 PROTOCOLO DE RECEPCIÓN DE LOS VIALES EN EL LABORATORIO.

La persona encargada del laboratorio debe cerciorarse del estado de los detectores y registrar posibles daños, como quebraduras sufridas durante el transporte, además el laboratorio debe emitir un informe con el siguiente contenido:

- a) Nombre y dirección del laboratorio.
- b) Nombre y dirección donde se realizaron las medidas.
- c) Identificación del sistema de medida.
- d) Cualquier otra información relevante para la interpretación de los resultados.
- e) El informe de resultados debe estar firmado por la persona o personas que aceptan la responsabilidad técnica del informe de medida, y en él constará su fecha de emisión.
- f) Los valores medidos se deben expresar como concentraciones de radón (Rn^{222}) en Becquerelios por metro cúbico (Bq/m^3)
- g) Datos de localización de los detectores.

En el flujograma de la Figura 4.35 se muestra un resumen del procedimiento previamente detallado para muestreo en recintos cerrados y exteriores según sea el caso.

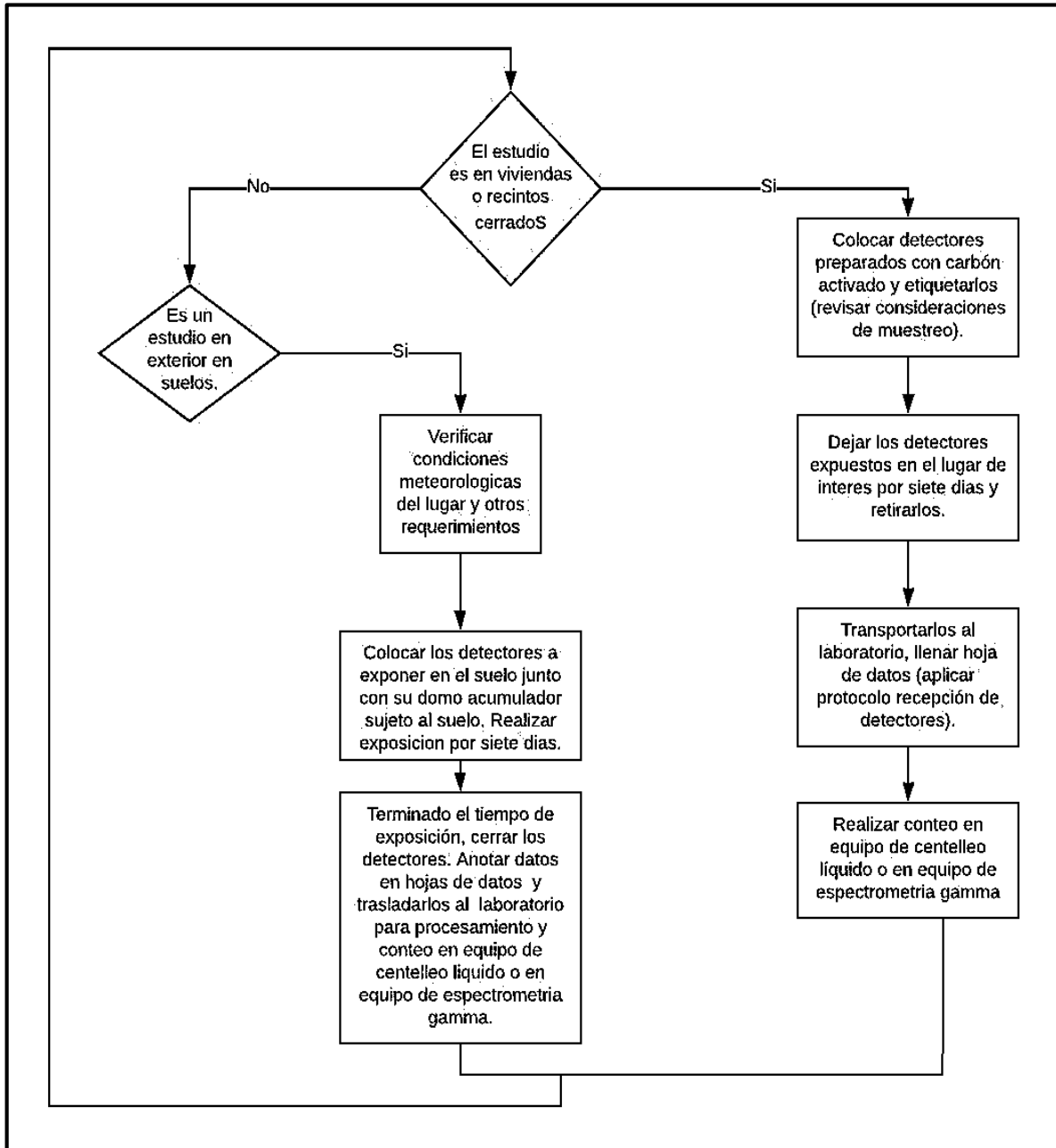


Figura 4.35: Flujograma de muestreo en espacios cerrados o exterior o en suelos.

4.11 TRATAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DE DESECHOS RADIATIVOS GENERADOS EN LABORATORIO.

Los desechos generados por la metodología, pueden ser tratados de acuerdo al tipo de desecho que se presente. Para ampliar los procedimientos de los desechos generados por la puesta en marcha de la metodología se debe dirigir al Anexo 4 y a la misma vez revisar la Tabla 4.24.

Tabla 4.24: Descarte o tratamiento de desechos radiactivos.

Tipo de desecho	Tratamiento viable para su reutilización o descarte
Desechos radiactivos de muy baja actividad de vida larga (carbón activado utilizado en el muestreo y calibración)	Regeneración térmica, asumiendo que hubo 100% de desorción de radón en el coctel de centelleo y quedan solo remanentes orgánicos en el carbón.
Desechos radiactivos de muy baja actividad de vida corta (líquidos de centello)	Almacenamiento en recipientes herméticos.
Desechos radiactivos de muy baja actividad de vida larga (fuentes emanadoras)	Almacenamiento en recipientes herméticos en cuartos con blindajes, para posterior utilización en calibración.

4.12 PRUEBAS SUGERIDAS PARA OPTIMIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA.

Estas pruebas son opcionales de realizarse al finalizar la metodología planteada previamente, como opción para optimizar el método según los resultados obtenidos o estudiar cambios y verificar su efecto sobre la tendencia de los valores o resultados.

4.12.1 Utilización de cánister de carbón activado como dispositivo.

Durante el desarrollo inicial de la metodología se utiliza el vial de vidrio propuesto por Canoba y López como el dispositivo de muestreo, pero se puede reemplazar por el cánister de carbón activado sugerido por la Guía de la EPA 520/5-87-005

4.12.1.1 Procedimiento de preparación del dispositivo de muestreo cánister de carbón activado (este diseño de dispositivo sigue las recomendaciones de la Guía de la EPA 520/5-87-005).

Para prepararlo se tiene que:

- 1) Desechar la silica gel y el carbón activado a 120 °C durante 3 horas.
- 2) Pesar entre 89 g y 71 g de carbón activado de 6X16 Mesh.
- 3) Colocar el carbón pesado en el cánister de metal de 4 pulg de diámetro y 1/8 pulg de profundidad
- 4) Colocar encima una pantalla metálica con abertura de al menos de 30 a 50 %. Formando el sistema de la figura 4.36.

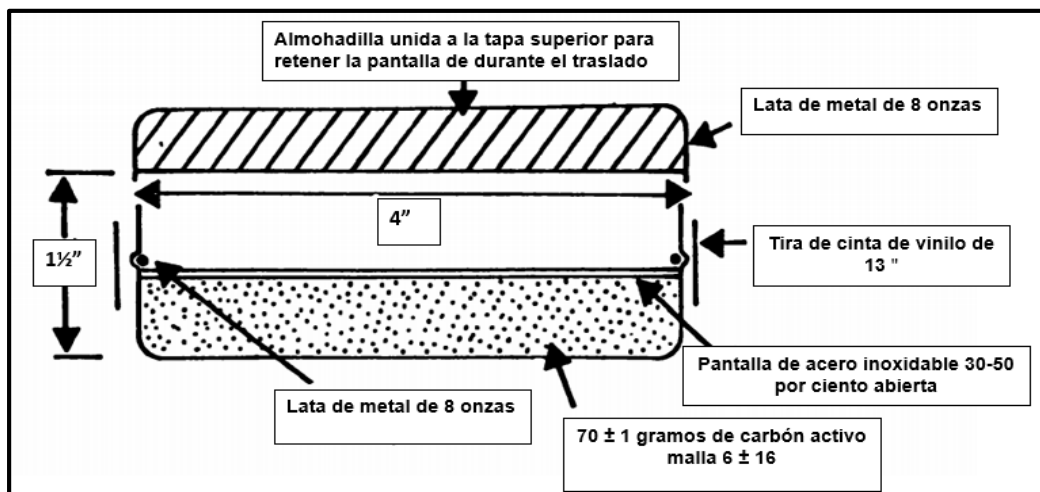


Figura 4.36: Configuración de cánister de carbón activado recomendado por la EPA.
Fuente: (EPA, 1987).

4.12.2 Prueba de determinación del dispositivo más óptimo.

Para comparar los dispositivos y seleccionar el óptimo se tiene que:

- 1) Preparar dispositivo de muestreo – vial de vidrio.
- 2) Preparar dispositivo de muestreo –cánister de carbón activado.
- 3) Ingresar la fuente emanadora a la cámara de calibración.
- 4) Colocar ambos dispositivos al mismo tiempo dentro de la cámara y con la fuente emanadora.
- 5) Dejarlos por un período de 2 horas, retirarlos y llevarlos a equipo de conteo ya sea de centelleo líquido o espectrometría gamma.
- 6) Repetir el procedimiento para 4 y 6 horas (si es necesario extender tiempo de prueba).

4.12.3 Propuesta de prueba: Variación de la altura de torre de lecho empacado (carbón activado) en viales de vidrio.

Se propone realizar pruebas con el objetivo de mejorar el proceso de adsorción, para ello se propone realizar variaciones en las cantidades de carbón activado en el interior del vial para incrementar la altura de lecho empacado y así con estas pruebas verificar su influencia en la capacidad de adsorción y fenómeno de transferencia de masa por adsorción. Esta prueba pretende comparar el vial propuesto por Canoba y López con otros dos viales donde se aumente en 1 g y 2 g el carbón, es decir dos configuraciones como las mostradas en las Figuras 4.37 y 4.38.

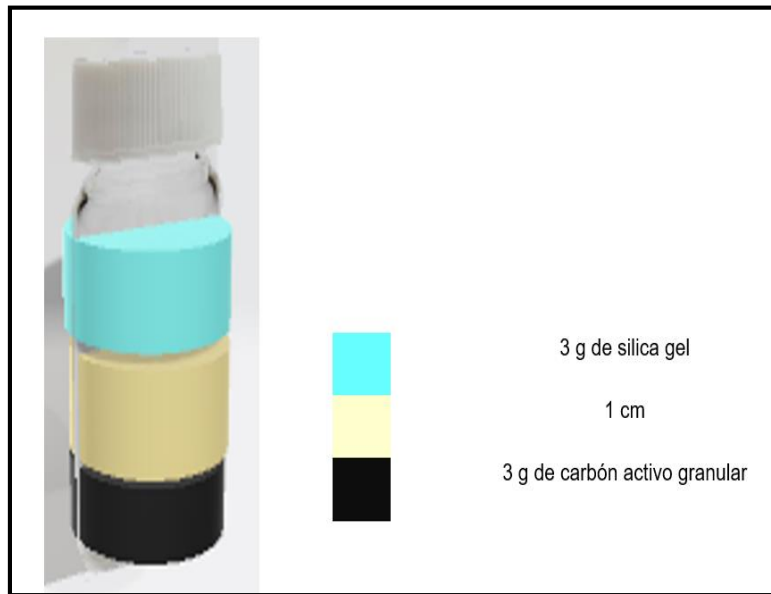


Figura 4.37: Dispositivo configuración A.

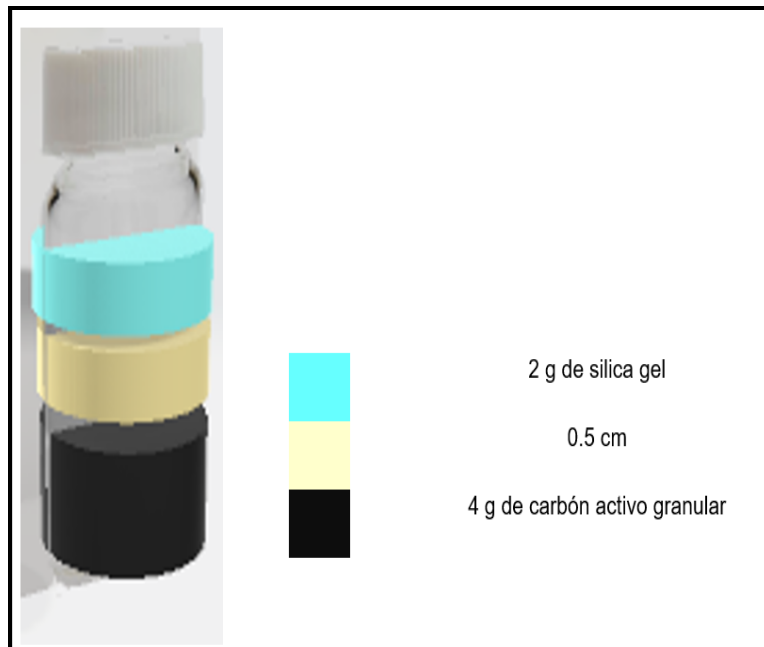


Figura 4.38: Dispositivo configuración B.

La prueba de eficiencia de adsorción consistirá en el cálculo experimental del espesor de carbón activado (en unidades de longitud) a través del cual el gas radón pasa y es retenido, para lograrlo se evaluarán simultáneamente tres viales colocándolos dentro de un recipiente de plástico impermeable al radón en donde estarán expuestos a una fuente de radón durante un tiempo de 6 horas pasado ese tiempo se retiraran los viales y se medirá la concentración de radón en el equipo de centelleo líquido o en el equipo de espectrometría gamma para mejorar la detección en los equipos de centelleo y espectrometría gamma.

Además, de la prueba anterior se pueden generar tendencias de adsorción respecto a la posición del carbón en el lecho dentro del vial. Los pasos a seguir para esta prueba son los siguientes:

- 1) Preparar 5 viales de carbón activado a su máximo capacidad y altura sin silica y membrana difusora, se debe considerar que la altura del carbón se debe dividir en al menos 5 partes iguales con una malla plástica. Esta malla deberá permitir la transferencia y también que la torre quede seccionada, para cuando se lleve al equipo se pueda llevar en secciones separadas a diferentes alturas.
- 2) Colocar fuente emanadora en cámara y dejar una hora para lograr equilibrio.
- 3) Ingresar los 5 viales a la cámara.
- 4) Retirar los viales al pasar 2 horas.
- 5) Llevar las secciones de carbón activado de los cinco viales a equipo para conteo.
- 6) Registrar resultados el conteo y la altura de cada sección y a que vial pertenecen de los cinco ingresados.

7) Se puede repetir procedimiento para duración de 4, 6 y 8 horas (de ser necesario repetir para un día).

4.12.3.1 Cálculos y determinación de altura óptima de lecho de carbón activado.

Para estimar la mejor altura de lecho se grafica el valor de las cuentas netas para las secciones según su altura o distancia desde la base del vial. Un ejemplo de esta tendencia se muestra en la Figura 4.39 según antecedentes realizados por Akber & Alharbi (2014).

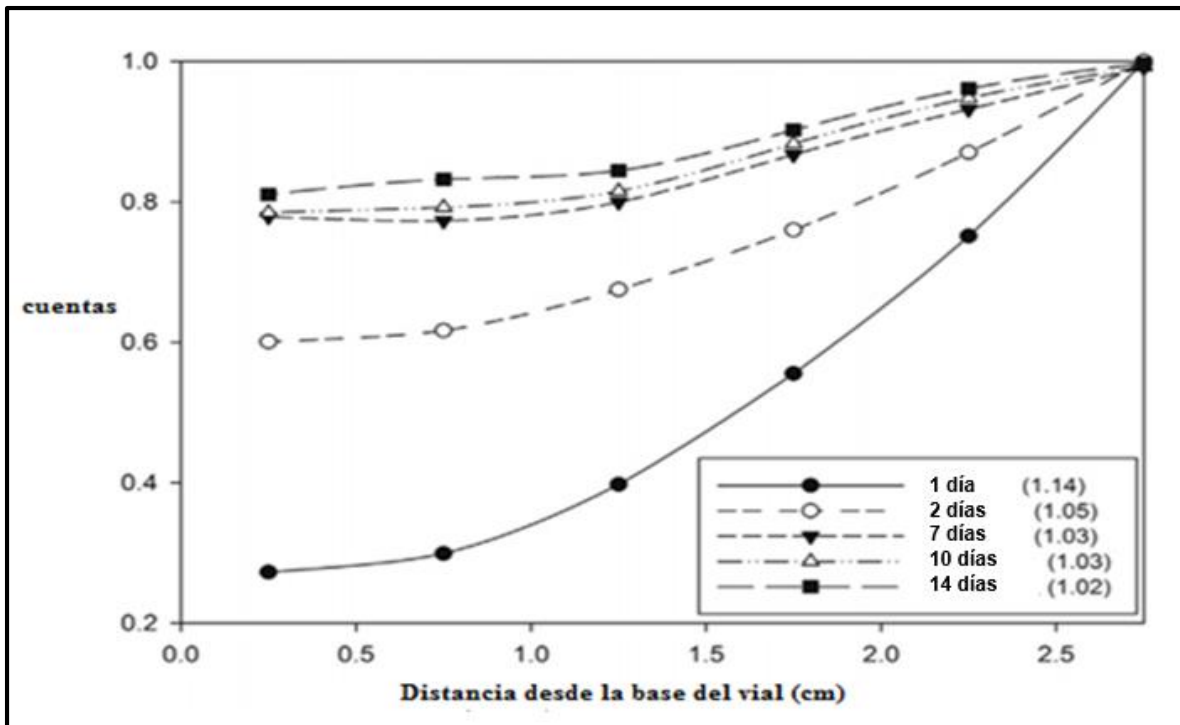


Figura 4.39: Distribución de radón (Rn^{222}) en un lecho de carbón activado para diversos tiempos de exposición. Fuente: (Akber & Alharbi ,2014).

4.12.4 Procedimiento de conteo en el equipo de espectrometría gamma.

Se sugiere realizar conteos en equipo de espectrometría gamma adicionalmente a las realizadas con centelleo líquido, esta prueba se sugiere luego de que se defina un vial que pueda captar mayor cantidad de radón, que pudiera ser el cánister de carbón activado o con un vial con una torre de carbón activado más alta. En esta técnica se utiliza un detector gamma de centello de yoduro sódico, formado por una sustancia luminiscente, capaz de absorber la energía de la radiación y emitirla en forma de fotones.

El detector de NaI tiene geometría cilíndrica con dimensiones de diámetro igual a 5.8 cm (véase las Figuras 4.40 y 4.41); y va unido a un tubo fotomultiplicador que transforma la señal luminosa en una señal eléctrica, alimentado con una fuente de alta tensión, que se conecta a un amplificador, y este a un analizador multicanal. El detector está protegido de la radiación exterior por un blindaje de plomo (véase la Figura 4.42). El esquema general del detector se muestra en la Figura 4.43. Las imágenes 4.40, 4.41, 4.42, 4.44 y 4.45, fueron proporcionadas por los docentes asesores que laboran en el CIAN, ya que debido a la pandemia y cierre de las instalaciones de la UES no se pudo tener acceso al equipo.



Figura 4.40: Diámetro del detector de NaI.



Figura 4.41: Detectores de NaI con los que cuenta el laboratorio del CIAN-FIA-UES.



Figura 4.42: Blindaje de plomo que recubre el sistema.

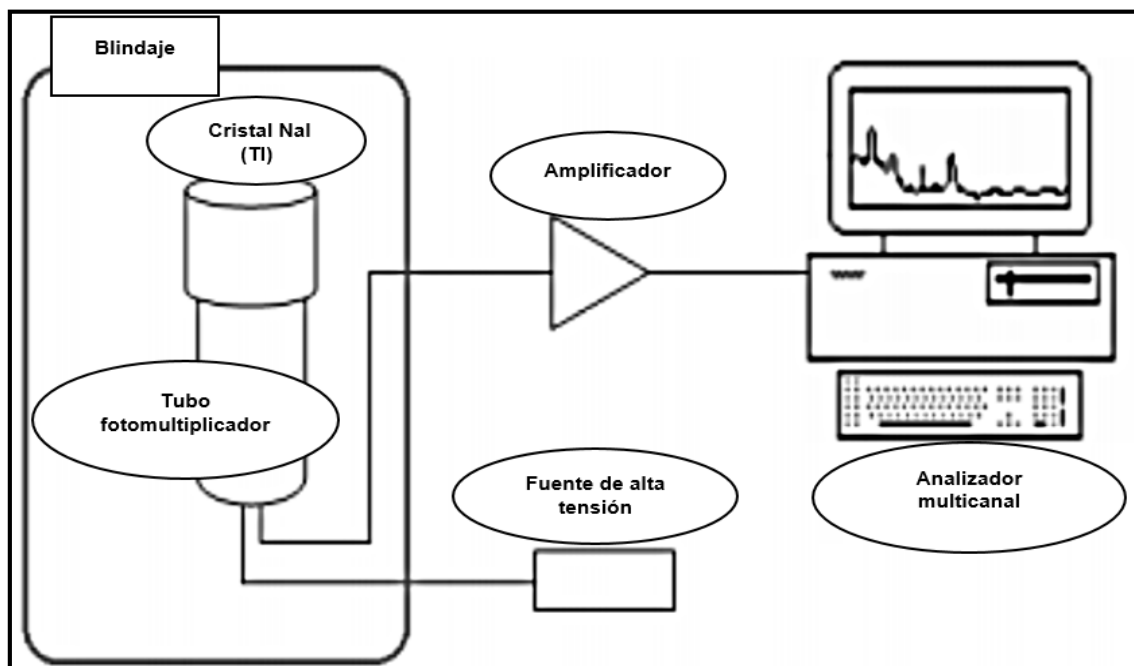


Figura 4.43: Esquema general del detector de centelleo de yoduro sódico. Fuente: (Noverques Medina, 2017).

En las instalaciones del laboratorio CIAN-FIA-UES se cuenta con un detector de centelleo de yoduro sódico; en el cual se puede observar la disposición de las partes que lo conforman en la Figura 4.44.



Figura 4.44: Detector de centelleo de yoduro sódico.

El procedimiento para realizar el conteo de la actividad de radón adsorbido en los poros del carbón activado en el equipo de espectrometría gamma es el siguiente:

Paso 1: En el software del espectrómetro se configuran las dos regiones de interés (ROI), 220-295 keV y 565-655 keV aproximadamente.

La muestra de carbón activado radiactiva dentro del vial de vidrio se coloca encima del detector de forma que la radiación gamma interacciona con el cristal de NaI y produzca una emisión de luz de baja energía (véase la Figura 4.45), la medición del detector se hará durante 600 segundos dentro del espectrómetro (Noverques Medina, 2017)

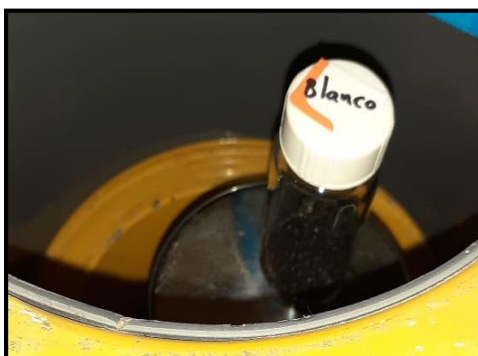


Figura 4.45: Colocación de muestra de carbón activado sobre detector de NaI.

Paso 2: La luz es recogida en el fotocátodo del tubo fotomultiplicador, que genera entonces un pulso eléctrico con amplitud proporcional a la energía absorbida en el cristal, luego los pulsos eléctricos son amplificados y finalmente llegan al analizador multicanal que se encarga de clasificarlos según su amplitud. De esta forma se obtiene un espectro que es proporcional a la energía de la radiación incidente que llega al detector.

Paso 3: La concentración de gas radón se determina a partir de las emisiones gamma de los isótopos del plomo (Pb^{214}) y el bismuto (Bi^{214}) (descendientes de vida corta del radón que alcanzan el equilibrio secular al cabo de 3 horas).

El analizador multicanal muestra un espectro del plomo (Pb^{214}) y el bismuto (Bi^{214}), como el de la Figura 4.46:

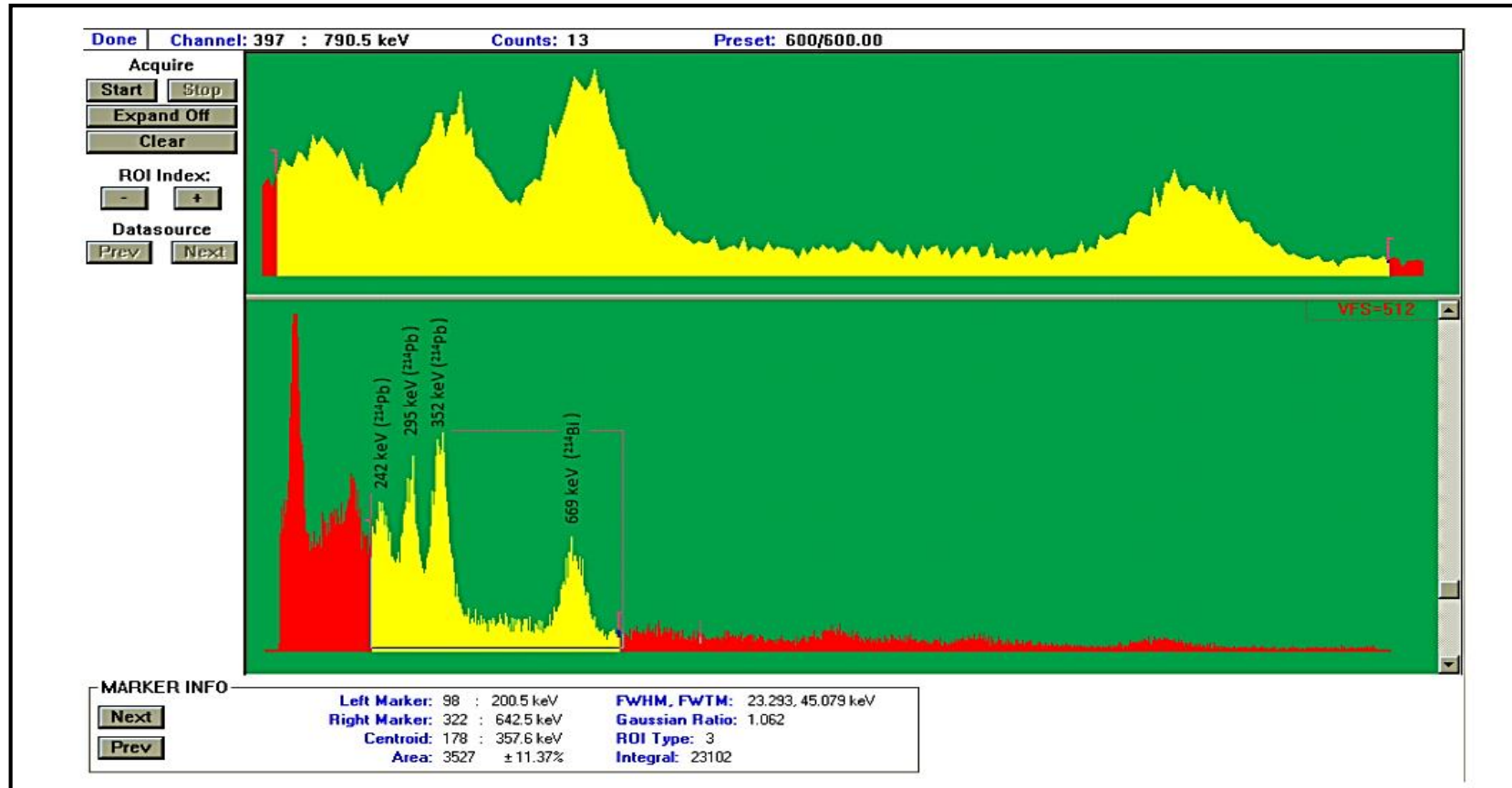


Figura 4.46: Espectro obtenido con el detector de centelleo de yoduro sódico para una muestra de carbón activado con radón. Fuente: (Fuente Lastra, 2016).

En el color amarillo se muestra el triplete correspondiente a las emisiones gamma del Pb^{214} y el fotopico de la emisión gamma del bismuto (Bi^{214}). Las energías gamma que detecta el equipo de cada isótopo son las que se presentan en la Tabla 4.25.

Tabla 4.25: Energías gamma del plomo (Pb^{214}) y del bismuto (Bi^{214}).

Isótopo	Energía gamma (keV)
Pb^{214}	242, 294, 352
Bi^{214}	609

Fuente: (Fuente Lastra, 2016)

El espectro de los descendientes del radón de vida corta depende en gran medida de la sensibilidad del equipo, es por eso que dependiendo del equipo de centelleo con el que se cuente este puede variar ligeramente.

CAPITULO 5: RESULTADOS, SIMULACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE PROGRAMA KEMRADON-CIAN Y PROTOCOLO DE EVALUACIÓN DE METODOLOGÍA.

A lo largo de este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la puesta en marcha de dos pruebas experimentales; en primer lugar se evaluó la medición de gas radón en carbón activado aplicando centelleo líquido, en segundo lugar se evaluó la medición de gas radón en carbón activado aplicando espectrometría gamma, en donde a partir de los resultados experimentales en la primera técnica se logró estimar la actividad de gas radón, por el contrario en la segunda técnica no se logró estimar presencia de gas radón; por otra parte a partir de los resultados obtenidos en la primera prueba se hace una simulación del funcionamiento general del programa KEMRADÓN-CIAN, por último se presenta el protocolo de evaluación de la metodología que permitirá sustentar la fiabilidad del método.

5.1 PRUEBA PILOTO DE LABORATORIO PARA MEDICIONES DE RADÓN POR MEDIO DE CARBÓN ACTIVADO EN EL CENTRO DE INVESTIGACIONES Y APLICACIONES NUCLEARES (CIAN) DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

Objetivo: Identificar la adsorción de radón y/o sus descendientes radiactivos en carbón activado por medio del espectro de medición de la técnica de centelleo líquido y espectrometría gamma.

Metodología: Exposición a fuente natural (roca de uranio (U^{238}) de emanación de radón, de vial con carbón activado y posterior medición.

5.1.1 Medición con técnica de centelleo líquido.

1. El vial se coloca dentro de la cámara por un tiempo determinado (véase la Figura 5.1), la cámara contiene rocas con contenido de uranio (U^{238}), las cuales, por desintegración radiactiva natural, liberan gas radón.



Figura 5.1: Cámara que contiene viales con carbón activado y rocas uranílicas (izquierda). Exposición de 2 g de carbón activado a rocas que liberan gas radón al interior de la cámara (derecha).

2. Luego de terminado el tiempo de exposición del vial en la cámara, se retira y se le agrega 15 mL de coctel de centelleo a base de tolueno, se agita el vial y se cierra (véase la Figura 5.2).



Figura 5.2: Vial con carbón activado (derecha). Vial con carbón activado y coctel de centelleo a base de tolueno (izquierda).

Nota: Por falta de equipo de centrifugación, partículas de carbón activado quedan suspendidas en el interior de las paredes del vial.

3. El vial se coloca dentro del equipo de centelleo líquido (véase la Figura 5.3) durante 6 horas para que alcance el equilibrio secular de radón y sus descendientes.



Figura 5.3: Equipo de centelleo líquido CIAN-FIA-UES (izquierda). Porta casete y viales a medir dentro del equipo (derecha).

4. El equipo se programa para que mida cada vial durante 60 minutos a ventana abierta (0-2000 KeV).
5. Se registran los conteos por minuto (CPM) y se imprime la información en la Tabla 5.1 que se presenta a continuación.

Tabla 5.1: Registro de pruebas realizadas con equipo de centelleo líquido.

No.	Descripción	Fecha de medición	CPM (registrados)	tSIE
1	Vial blanco (Sin exposición en cámara)	01/10/2020	41.19	312
2	Vial 1h (Exposición de 1 hora)	09/10/2020	130.55	245
3	Vial 2h (Exposición de 2 horas)	13/10/2020	225.53	218
4	Vial 3h (Exposición de 3 horas)	27/10/2020	338.68	248
5	Vial 24h (Exposición de 24 horas)	22/10/2020	614.81	229

Observaciones:

- a. Se diferencia en el espectro blanco con respecto al espectro en contacto con gas radón, debido al registro de actividad.



Figura 5.4: Espectro de vial blanco en equipo de centelleo líquido.



Figura 5.5: Espectro que muestra la actividad registrada de CPM provenientes de radón y descendientes absorbidos en carbón activado.

- b. En la Tabla 5.1 se puede visualizar que en la medida que el carbón activado pasa más tiempo en exposición al gas radón, mayor cantidad de conteos se registran.
- c. El valor del tSIE registra el “quenching” o frenado de los pulsos de radiación que se detectan en el equipo. Si la muestra no tiene quenching, se registra un valor cercano a 1000 unidades, sin embargo, los valores registrados indican quenching en la muestra. La falta de centrifugado y el posible decantado del coctel a otro vial podrían mejorar el valor de extinción de la señal de medición. Además, el quenching reduce la señal del pulso eléctrico y por lo tanto la energía de emisión radiactiva, por lo que, el espectro se desplaza a valores de baja energía.

5.1.2 Medición con técnica de espectrometría gamma.

1. El equipo de espectrometría gamma registra las mediciones de energías de radionúclidos que emiten energía gamma o fotones en su desintegración radiactiva. El equipo de espectrometría gamma que posee el CIAN-FIA-UES es un equipo convencional el cual utiliza un castillo de plomo para eliminar registros de contribuciones externas a la medición y un módulo de generación de alta tensión para elevar el voltaje de operación hasta 900 ± 5 voltios del detector de NaI (véase la Figura 5. 6).



Figura 5.6. Módulos que componen espectrometría gamma de CIAN-FIA. Módulo A: generador de alta tensión. Módulo B: castillo de plomo como blindaje para que emisiones gamma exteriores no contribuyan en el conteo de la muestra que se coloca al interior. Módulo C: computador y monitor donde se configura, calibra y registra la información brindada por el equipo.

2. Se mide el fondo del equipo para registrar los conteos del ambiente (véase la Figura 5.7).

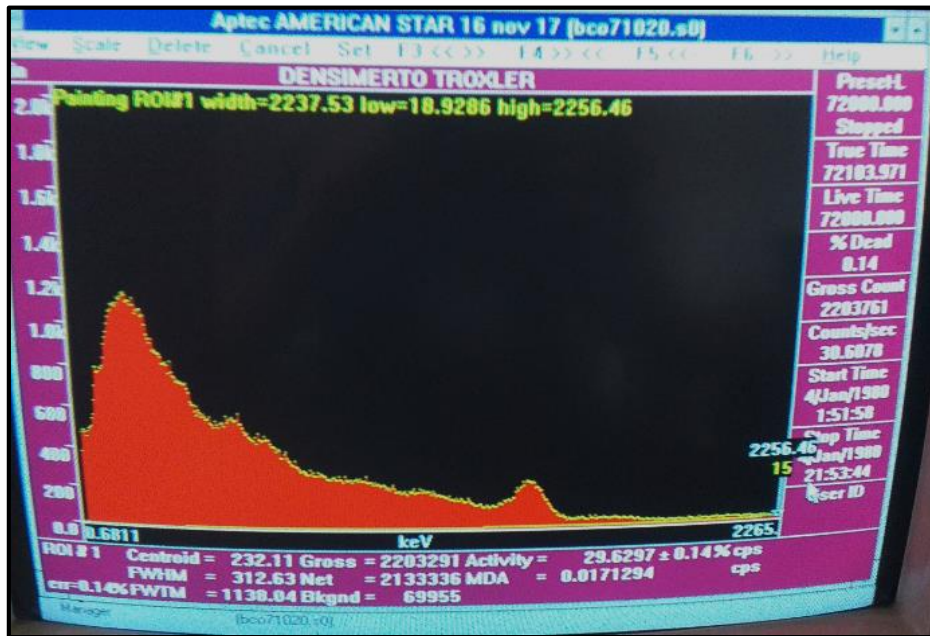


Figura 5.7: Espectro de fondo del equipo de espectrometría gamma

- Se realiza la medición de un vial conteniendo 2 g de carbón activado, sin exposición a gas radón, para determinar los conteos (blanco de reactivos).

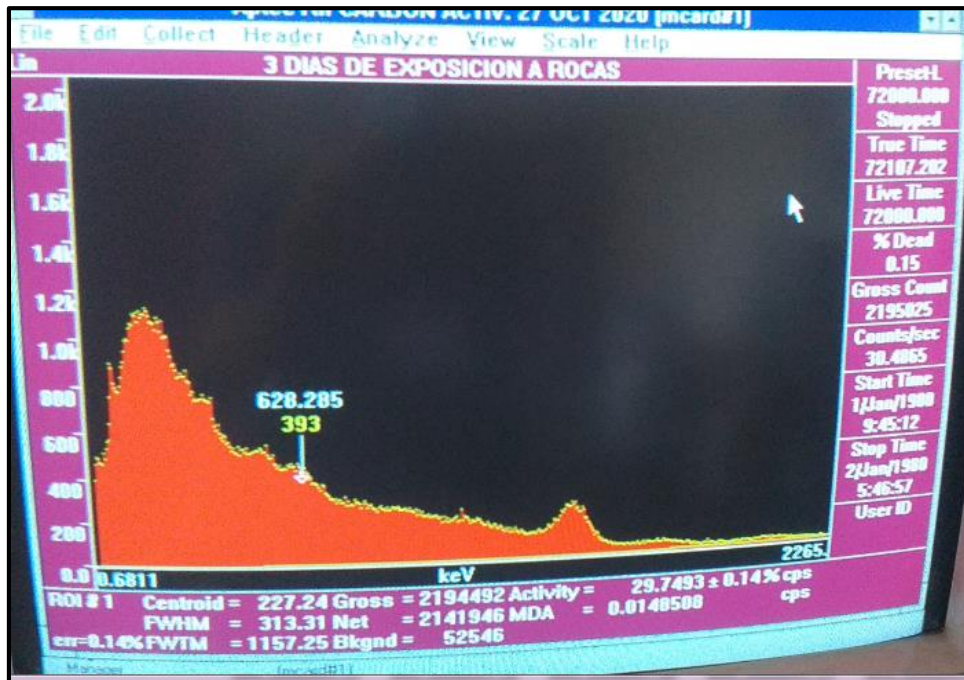


Figura 5.8: Espectro de fondo de vial con carbón activado.

4. Se colocó el vial durante 3 días de exposición en cámara con piedras que emanan gas radón (véase la Figura 5.1). Se retiró el vial, se cerró y luego se permitió el equilibrio secular durante 3 horas, posteriormente, se colocó dentro del castillo de plomo del equipo y se realizó la medición (véase la Figura 5.9) durante 20 horas (72000 s).

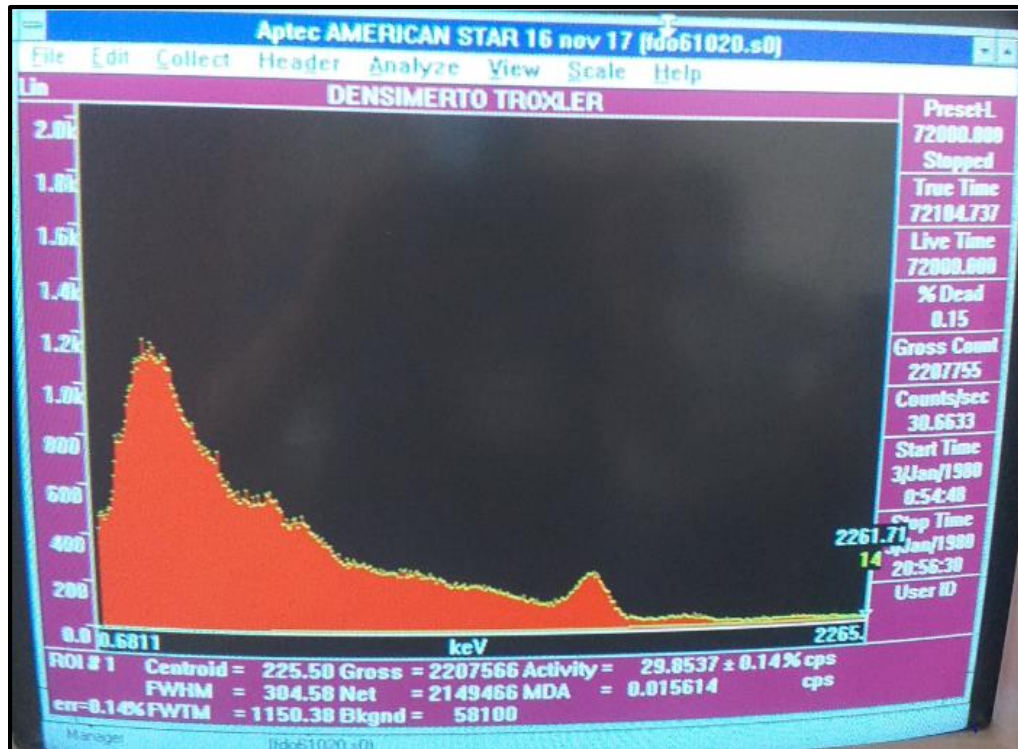


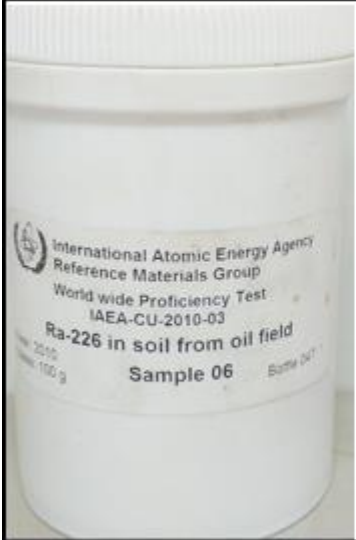
Figura 5.9: Espectro de medición de carbón activado en cámara con exposición de 3 días.

Observaciones:

- a. Los conteos registrados en el fondo del equipo (29.62 cps), en fondo de vial de medición (29.74 cps) y con el vial expuesto a radón durante 3 días (29.85) no registran diferencias, solamente de algunas décimas. En el espectro no se identifica algún pico de energía que pueda distinguirse del fondo, por lo que, la medición a exposición durante 3 días no dió los resultados esperados.

Esto puede deberse a la geometría del dispositivo de medición utilizado, el vial de centelleo, y a la cantidad de carbón activado en exposición. Utilizando un cánister y colocando mayor cantidad de carbón activado pudiese mejorarse la señal de medición, que permita registrar un espectro donde se pueda visualizar alguna señal de los emisores de los descendientes gamma del radón o registrar conteos por arriba del valor del fondo del equipo.

- b. La medición de un material de referencia de suelo que contiene radio (Ra^{226}) mediante estudio de comparación por parte de laboratorio con espectrometría gamma dió los resultados de la Figura 5.10.



Isotope	$\hat{A}_{\text{spec, Lab}}$ / Bq/g	$A_{\text{spec, IAEA}}$ / Bq/g
^{226}Ra	18.7(12)	19.05(26)
^{214}Pb	18.1(11)	-
^{214}Bi	17.53(77)	-
^{210}Pb	6.06(56)	-
^{228}Ac	1.59(12)	-
^{212}Pb	2.29(15)	-
^{40}K	0.374(44)	-

Figura 5.10: Material de referencia de suelo con Ra^{226} (izquierda) y tabla de resultados de intercomparación de materiales encontrados en la muestra y registro de actividad por parte del IAEA (derecha).

- c. La medición del material de referencia que contiene 19 Bq/g de Ra^{226} en el equipo de espectrometría gamma del CIAN-FIA-UES, registró el espectro que se muestra en la Figura 5.11.

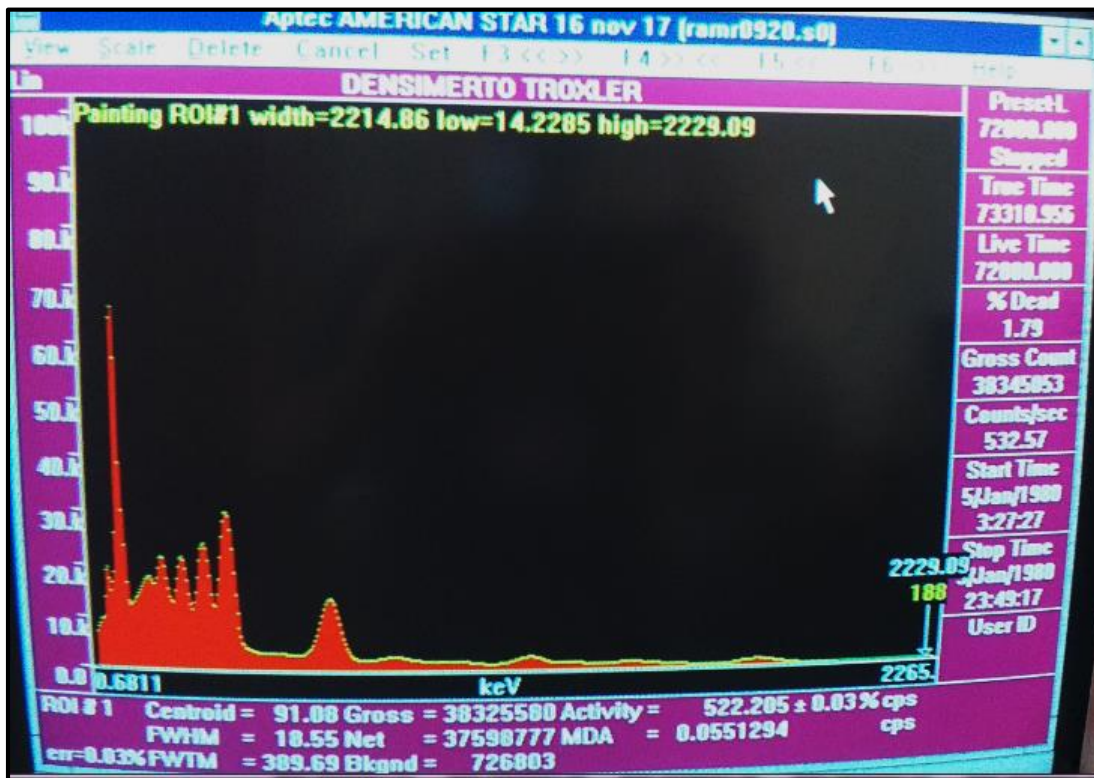


Figura 5.11: Espectro registrado de material de referencia de suelo con contenido de Ra^{226} .

- d. El material de referencia de suelo con Ra^{226} registró un conteo de 522 cps y puede visualizarse que el espectro es diferente al registrado con el carbón activado. Pueden visualizarse diferentes picos de emisión gamma provenientes de las emisiones de los radionúclidos presentes en la muestra. Lo que demuestra, que el equipo sí registra la actividad de radionúclidos, como radio y emisores gamma de radón, por lo que, se debe utilizar otro dispositivo de medición con carbón activado, que permita capturar más radón para que el equipo pueda detectarlo y diferenciarlo de los valores de fondo.

5.2 SIMULACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE PROGRAMA KEMRADÓN-CIAN PARA: PRUEBA PILOTO DE LA PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIONES DE GAS RADÓN (Rn^{222}) EN RECINTOS CERRADOS Y ESTUDIOS AMBIENTALES.

Para la propuesta final de la implementación para guardar y generar los cálculos y resultados de la información de la puesta en marcha de la metodología, se utilizará el programa KEMRADON-CIAN realizado en Microsoft Excel como base, el cual fue diseñado y programado por parte del grupo de tesis. En este se presentan distintas opciones como la caracterización del carbón activado, la calibración de la metodología y el muestreo para los dos tipos de estudios tanto en espacios cerrados como estudios ambientales. Así como la generación de los cálculos de concentración para los dispositivos muestreados y almacenamiento de los resultados, además presenta la plantilla para guardar e imprimir el informe final de la medición de gas radón en un dispositivo de muestreo.

5.2.1 Caracterización fisicoquímica de carbón activado de origen mineral.

Para cada lote de carbón activado el cual es utilizado en la adsorción del Rn^{222} es necesario realizar una previa caracterización. Estas caracterizaciones arrojarán datos los cuales serán utilizados posteriormente por el programa KEMRADON-CIAN. En el desarrollo del programa se pueden conocer algunos parámetros fisicoquímicos como lo son: la humedad, contenido de cenizas y densidad aparente. A continuación, en la Figura 5.12, se presenta la pantalla principal del programa en la cual se selecciona la opción que se desea trabajar dentro de la metodología.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE
 CENTRO DE INVESTIGACIONES Y APLICACIONES
 NUCLEARES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y
 ARQUITECTURA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR



PROPIETA DE METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE
 CONCENTRACIONES DE GAS RADÓN (Rn-222), EN
 RECINTOS
 CERRADOS Y ESTUDIOS AMBIENTALES

PRESENTADO POR:
 MAINOR STANLEY CORDOVA VÁSQUEZ
 MOISÉS ELÍAS GÓMEZ MIGUEL
 KAYLA REYES RIVERA

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL CARBÓN ACTIVADO

Determinación de la humedad

Determinación del contenido de cenizas

Determinación de la densidad aparente

DENSIDAD APARENTE Y CONCENTRACIÓN INICIAL DE RADIO EN TIERRA

CALIBRACIÓN DE METODOLOGÍA

CÁLCULOS CALIBRACIÓN DE METODOLOGÍA

GRÁFICOS CALIBRACIÓN DE METODOLOGÍA

MUESTREO VIVIENDAS O EDIFICIOS

MUESTREOS ESTUDIOS AMBIENTALES

CÁLCULOS MUESTREO

INFORME DE ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE GAS RADÓN EN AIRE APLICANDO CENTELLEO LÍQUIDO.

LINEALIDAD DEL MÉTODO

LIMITES



Figura 5.12: Pantalla inicial de programa KEMRADÓN-CIAN.

En la pantalla anterior al lado derecho se encuentra la opción para realizar la caracterización del lote de carbón activado con el que se trabajará en el dispositivo de muestreo, como se observa en la Figura 5.13.



Figura 5.13: Pantalla donde se selecciona el parámetro fisicoquímico a calcular para el lote de carbón activo utilizado.

5.2.1.1 Determinación del porcentaje de humedad (%H).

Al seleccionar la opción de “determinación de la humedad” en la pantalla anterior. Se calcula la humedad para una muestra de carbón activado de origen mineral de 4 g contenida en una cápsula de porcelana de capacidad de 100 mL con un peso de 65 g. Además, se debe de conocer el peso de la muestra seca de carbón activado para el presente caso es de 68.75 g. Estos datos ya ingresados generan un porcen-

taje de humedad de un 6.25% para la presente muestra representativa del lote de carbón activo utilizado.

Variable	Valor
Tipo de carbón activado	Origen mineral
B: Peso de la capsula vacía (g)	65
C: Peso de la capsula más muestra inicial (g)	69
D: Peso de la capsula más muestra seca (g)	68.75
Porcentaje de humedad (%H)	6.25

Figura 5.14: Pantalla de ingreso de datos del carbón activo para el cálculo del porcentaje de humedad (%H).

a. Datos registrados en el programa KEMRADÓN-CIAN.

Luego de calcular el porcentaje de humedad del carbón activado, el programa guarda la información en la pantalla que se presenta a continuación. En esta se puede observar la fórmula utilizada para su cálculo, además de los datos previamente introducidos y el resultado de porcentaje de humedad para la muestra del lote. En la pantalla de la Figura 5.15 se observan los datos guardados.

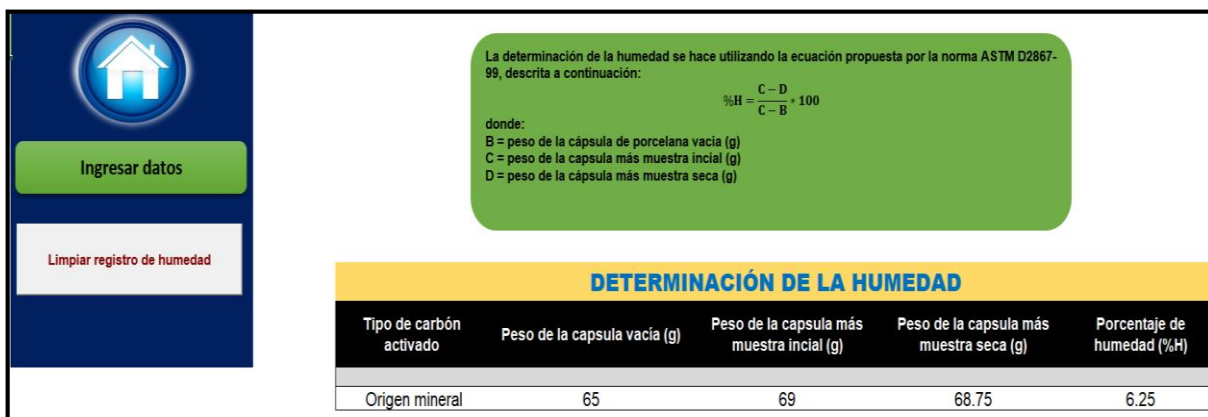


Figura 5.15: Pantalla donde se muestra la información guardada y generada para la determinación del porcentaje de humedad (%H).

5.2.1.2 Determinación del contenido de cenizas.

Al seleccionar la opción de “determinación del contenido de cenizas” de la pantalla de selección de los parámetros fisicoquímicos a calcular del carbón activado de la Figura 5.16.

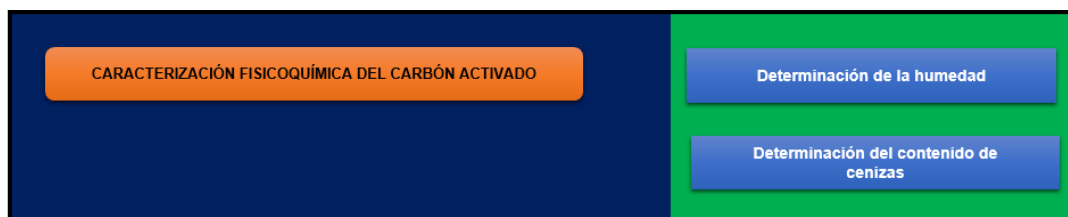


Figura 5.16: Selección del botón Determinación del contenido de cenizas

Se determinó el contenido de cenizas para una muestra de 4 g de carbón activado de origen mineral contenida en un crisol de 40 mL con un peso de 4.53 g para el crisol vacío. La muestra incinerada tiene un peso de 0.57 g. Generándose un resultado de 14.25 de porcentaje de cenizas totales para el carbón activado utilizado en la prueba piloto. A continuación, en la Figura 5.17 se muestra la pantalla para el ingreso de datos para el cálculo de este parámetro

Derterminación del contenido de cenizas

Tipo de carbón activado

B: Peso del crisol vacío (g)

C: Peso del crisol más muestra inicial

D: Peso del crisol más muestra

%Cenizas totales




Figura 5.17: Pantalla de ingreso de datos del carbón activo para el cálculo del porcentaje de cenizas totales.

a. Datos registrados en el programa KEMRADÓN-CIAN

Luego de calcular el porcentaje de cenizas totales del carbón activado, el programa guarda la información en la pantalla que se presenta a continuación. En esta se logra observar la fórmula utilizada para su cálculo, además de los datos previamente introducidos y el resultado de porcentaje de cenizas totales para la muestra del lote. En la pantalla de la Figura 5.18 se observan los datos guardados.

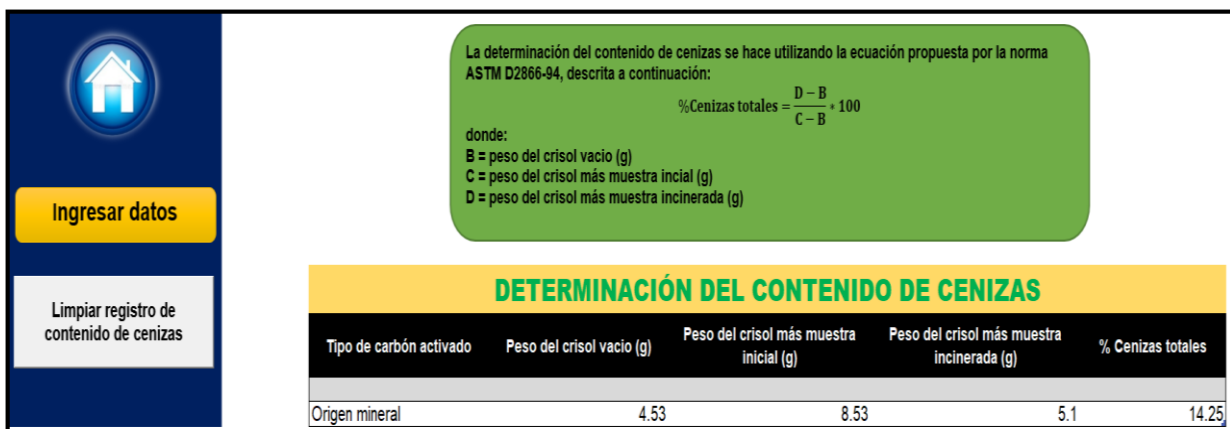


Figura 5.18: Pantalla donde se muestra la información guardada y generada para la determinación del porcentaje de cenizas totales.

5.2.1.3 Determinación de la densidad aparente (Dar).

Seleccionando la opción de “determinación de la densidad aparente” de la pantalla de selección de los parámetros fisicoquímicos a calcular del carbón activado. Se calcula la densidad aparente recibida para una muestra de 120 g de carbón contenida en un cilindro metálico graduado de 250 mL de capacidad. La muestra presenta una densidad aparente recibida de 0.48 g/mL. La pantalla de captura de datos se muestra en la Figura 5.19.

Densidad aparente recibida

KEMRADÓN
1910 - 1910 - 0010

mc: Masa de carbón activado (g)

Vc: Volumen de carbón (mL)

Dar: Densidad aparente recibida (g/mL)

Figura 5.19: Pantalla de ingreso de datos del carbón activo para el cálculo de la densidad aparente recibida.

Posteriormente se calcula la densidad aparente seca tomando en cuenta el porcentaje de humedad calculado anteriormente que fue de 6.25% y la densidad aparente recibida. Los datos son presentados en la pantalla que se muestra en la Figura 5.20, con un resultado de 0.45 g/mL para la densidad aparente seca de la muestra de lote de carbón activado.

El cálculo de la densidad aparente recibida se determina para una muestra granular de carbón activado, mediante la medición del volumen empaquetado y determinando la masa del volumen conocido, haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad aparente recibida } \left(\frac{\text{g}}{\text{mL}}\right) = \frac{m_c}{V_c}$$

donde:
 m_c = masa de carbón activado (g)
 V_c = volumen de carbón (mL)

Obtenida la densidad aparente recibida se procede al cálculo de la densidad aparente recibida en seco de la siguiente manera:

$$D_a = D_{ar} \left(1 - \frac{\%H}{100}\right)$$

donde:
 D_a = densidad aparente seca (g/mL)
 D_{ar} = densidad aparente recibida (g/mL)

DETERMINACIÓN DE DENSIDAD APARENTE SECA			
Masa de carbón activado (g)	Volumen de carbón (mL)	Densidad aparente recibida (g/mL)	Densidad aparente seca (g/mL)
120	250	0.48	0.45

Figura 5.20: Pantalla donde se muestra la información guardada y generada para la determinación de la densidad aparente.

5.3 SIMULACIÓN DE CALIBRACIÓN DE LA METODOLOGÍA.

En la Tabla 5.1 se presentan los resultados de las pruebas preliminares de conteos en minutos de 4 dispositivos expuestos a una roca con contenido de uranio, dichos datos fueron proporcionados por los asesores del CIAN como parte de una prueba piloto de la metodología, a partir de estos datos experimentales se proyectará la tendencia de los conteos por minutos que registrarían los siguientes dispositivos de adsorción de radón (Rn^{222}), si la prueba se prologará para un periodo de 7 días, y se hicieran extracciones de 3 viales cada 6 y 24 horas respectivamente hasta completar el tiempo total de duración de la prueba.

En las Figuras 5.21 y 5.22 se presenta la tabla resumen donde se utilizó la función (*TENDENCIA*) para obtener la tendencia proyectada de las cuentas por minuto (CPM) de los demás dispositivos de muestreo por medio del programa Microsoft Excel, con esta función lo que se obtiene son números en una tendencia lineal que coinciden con puntos teóricos de datos conocidos, usando el método de mínimos cuadrados para generar el set de datos para los 7 días de muestreo con extracciones de los dispositivos a las 9:00 a.m y 3:00 p.m.

			Tiempo de exposición (h)	Tiempo de exposición (min)	Tiempo total (s)	CPM
	Inicio de la calibración	9:00 a.m	0	0	0	41.19
			1	0	3600	130.55
			2	0	7200	225.53
			3	0	10800	338.68
Primero	1	3:00 p. m.	6	0	21600	=TENDENCIA(\$3:\$G6;\$F3:\$F6;\$F7)
	2		6	1	21660	TENDENCIA(conocido_y; [conocido_x]; [nueva_matriz_x]; [constante])
	3		6	2	21720	631.63
	1	9:00 a.m	24	0	86400	2405.75
	2		24	1	86460	2407.40
	3		24	2	86520	2409.04
Segundo	1	3:00 p. m.	30	0	108000	2998.22
	2		30	1	108060	2999.87
	3		30	2	108120	3001.51
	1	9:00 a.m	48	0	172800	4775.63
	2		48	1	172860	4777.28
	3		48	2	172920	4778.92

Figura 5.21: Pantalla que muestra la función TENDENCIA de Microsoft Excel para la generación de los datos adicionales de la prueba piloto.

			Tiempo de exposición (h)	Tiempo de exposición (min)	Tiempo total (s)	CPM
	Inicio de la calibración	9:00 a.m	0	0	0	41.19
			1	0	3600	130.55
			2	0	7200	225.53
			3	0	10800	338.68
Primero	1	3:00 p. m.	6	0	21600	628.34
	2		6	1	21660	629.99
	3		6	2	21720	631.63
	1	9:00 a.m	24	0	86400	2405.75
	2		24	1	86460	2407.40
	3		24	2	86520	2409.04

Figura 5.22: Continuación de la pantalla que muestra la función TENDENCIA de Microsoft Excel para la generación de los datos adicionales de la prueba piloto.

			Tiempo de exposición (h)	Tiempo de exposición (min)	Tiempo total (s)	CPM
Segundo	1	3:00 p. m.	30	0	108000	2998.22
	2		30	1	108060	2999.87
	3		30	2	108120	3001.51
	1	9:00 a.m.	48	0	172800	4775.63
	2		48	1	172860	4777.28
	3		48	2	172920	4778.92
Tercero	1	3:00 p. m.	54	0	194400	5368.10
	2		54	1	194460	5369.75
	3		54	2	194520	5371.39
	1	9:00 a.m.	72	0	259200	7145.51
	2		72	1	259260	7147.16
	3		72	2	259320	7148.80
Cuarto	1	3:00 p. m.	78	0	280800	7737.98
	2		78	1	280860	7739.63
	3		78	2	280920	7741.27
	1	9:00 a.m.	96	0	345600	9515.39
	2		96	1	345660	9517.04
	3		96	2	345720	9518.68
Quinto	1	3:00 p. m.	102	0	367200	10107.86
	2		102	1	367260	10109.51
	3		102	2	367320	10111.15
	1	9:00 a.m.	120	0	432000	11885.27
	2		120	1	432060	11886.92
	3		120	2	432120	11888.56
Sexto	1	3:00 p. m.	126	0	453600	12477.74
	2		126	1	453660	12479.39
	3		126	2	453720	12481.03
	1	9:00 a.m.	144	0	518400	14255.15
	2		144	1	518460	14256.80
	3		144	2	518520	14258.44
Septimo	1	3:00 p. m.	150	0	540000	14847.62
	2		150	1	540060	14849.27
	3		150	2	540120	14850.91
	1	9:00 a.m.	168	0	604800	16625.03
	2		168	1	604860	16626.68
	3		168	2	604920	16628.32

Figura 5.22: Continuación de la pantalla que muestra la función TENDENCIA de Microsoft Excel para la generación de los datos adicionales de la prueba piloto.

Se deben de ingresar los datos para cada uno de los dispositivos muestreados para generar los resultados de la calibración de la metodología: El primer campo requerido solo es llenado para el primer vial de la calibración, así como el segundo campo solo es llenado para el último vial de la calibración. Se introduce como fecha de ini-

cio de la calibración el 21/10/2020 y como finalización el 28/10/2020 para una duración de 7 días. Con una temperatura de la cámara de 25°C y un porcentaje de humedad de un 20%, la fuente emanadora fue una roca de uranio mineral. Posteriormente se hace el llenado de los siguientes campos con los datos puntuales para cada uno de los dispositivos expuestos en la cámara de calibración (véase las Figuras 5.23 y 5.24).

Fecha de inicio de la calibración (solo aplica en el ingreso del primer dispositivo) 21/10/2020

Fecha de finalización de la calibración (solo aplica en el ingreso del ultimo dispositivo)

Temperatura de trabajo (°C) 25

Humedad de trabajo (%H) 20

Fuente emanadora de radón Roca

Código de dispositivo de muestreo D1-AN1

Color de etiqueta Anaranjado-primer dia de extracción

Dia de extracción Primero

ts: (s) (periodo de exposición del vial) 21600

td: (s) (tiempo transcurrido desde la finalización de la exposición y el inicio del conteo) 21600

tc: (s) (periodo de conteo) 3600

Conteo blanco (CPM) 41.19

Conteo del dispositivo (CPM) 628.34

pa: (g) (peso del dispositivo antes de la exposición) 4

pd: (g) (peso del dispositivo después de la exposición) 4

Agregar Limpiar

Figura 5.23: Pantalla de ingreso de datos de cada uno de los dispositivos para la calibración- llenado de primer dispositivo

Fecha de finalización de la calibración (solo aplica en el ingreso del último dispositivo)

Ingresar datos de calibración

Fecha de inicio de la calibración (solo aplica en el ingreso del primer dispositivo)

Fecha de finalización de la calibración (solo aplica en el ingreso del último dispositivo)

Temperatura de trabajo (°C)

Humedad de trabajo (%H)


Fuente emanadora de radón

Código de dispositivo de muestreo

Color de etiqueta

Día de extracción

ts: (s) (periodo de exposición del vial)



td: (s) (tiempo transcurrido desde la finalización de la exposición y el inicio del conteo)

tc: (s) (periodo de conteo)

Conteo blanco (CPM)

Conteo del dispositivo (CPM)

pa: (g) (peso del dispositivo antes de la exposición)

pd: (g) (peso del dispositivo después de la exposición)

Figura 5.24: Pantalla de ingreso de datos de cada uno de los dispositivos para la calibración- llenado de ultimo dispositivo.

5.3.1 Datos registrados en el programa KEMRADÓN-CIAN para la calibración.

Luego de ingresar los datos para cada uno de los dispositivos utilizados en la calibración de la metodología se guardan en la pantalla de la hoja del programa KEMRADÓN-CIAN que se presenta en la Figura 5.25. Para poder generar las ecuaciones y curvas de calibración que posteriormente serán utilizados en los cálculos de concentración de radón (Rn^{222}) para cada una de las muestras.

Fecha de inicio de la calibración	Temperatura de trabajo (°C)	Humedad de trabajo (%H)	Fuente emanadora de radón	Código de dispositivo de muestreo	Color de etiqueta de muestreo	ts (s) (periodo de exposición del dispositivo)	td (s) (tiempo transcurrido desde la finalización de la exposición y el inicio del conteo)	tc (s) (periodo de conteo)	Conteo blanco (CPM)	Conteo del dispositivo (CPM)	pa (g) (peso del dispositivo antes de la exposición)	pd (g) (peso del dispositivo después de la exposición)
21/10/2020	25	20	Roca	D1-AN1	Anaranjado-primer día de extracción	21600	21600	3600	41.19	628.34	4	4
	25	20	Roca	D1-AN2	Anaranjado-primer día de extracción	21660	21600	3600	41.19	629.99	4	4.001
	25	20	Roca	D1-AN3	Anaranjado-primer día de extracción	21720	21600	3600	41.19	631.63	4	4.001
	25	20	Roca	D1-AN4	Anaranjado-primer día de extracción	86400	21600	3600	41.19	2405.75	4	4.002
	25	20	Roca	D1-AN5	Anaranjado-primer día de extracción	86460	21600	3600	41.19	2407.4	4	4.002
	25	20	Roca	D1-AN6	Anaranjado-primer día de extracción	86520	21600	3600	41.19	2409.04	4	4.002
	25	20	Roca	D2-AZ1	Azul-segundo día de extracción	108000	21600	3600	41.19	2998.22	4	4.003
	25	20	Roca	D2-AZ2	Azul-segundo día de extracción	108060	21600	3600	41.19	2999.87	4	4.003
	25	20	Roca	D2-AZ3	Azul-segundo día de extracción	108120	21600	3600	41.19	3001.51	4	4.003
	25	20	Roca	D2-AZ4	Azul-segundo día de extracción	172800	21600	3600	41.19	4775.63	4	4.004
	25	20	Roca	D2-AZ5	Azul-segundo día de extracción	172860	21600	3600	41.19	4777.28	4	4.004
	25	20	Roca	D2-AZ6	Azul-segundo día de extracción	172920	21600	3600	41.19	4778.92	4	4.004
	25	20	Roca	D3-VD1	Verde-tercer día de extracción	194400	21600	3600	41.19	5368.1	4	4.005
	25	20	Roca	D3-VD2	Verde-tercer día de extracción	194460	21600	3600	41.19	5369.75	4	4.005
	25	20	Roca	D3-VD3	Verde-tercer día de extracción	194520	21600	3600	41.19	5371.39	4	4.005
	25	20	Roca	D3-VD4	Verde-tercer día de extracción	259200	21600	3600	41.19	7145.51	4	4.006
	25	20	Roca	D3-VD5	Verde-tercer día de extracción	259260	21600	3600	41.19	7147.16	4	4.006
	25	20	Roca	D3-VD6	Verde-tercer día de extracción	259320	21600	3600	41.19	7148.8	4	4.006
	25	20	Roca	D4-AM1	Amarillo-cuarto día de extracción	280800	21600	3600	41.19	7737.98	4	4.007
	25	20	Roca	D4-AM2	Amarillo-cuarto día de extracción	280860	21600	3600	41.19	7739.63	4	4.007
	25	20	Roca	D4-AM3	Amarillo-cuarto día de extracción	280920	21600	3600	41.19	7741.27	4	4.007
	25	20	Roca	D4-AM4	Amarillo-cuarto día de extracción	345600	21600	3600	41.19	9515.39	4	4.008
	25	20	Roca	D4-AM5	Amarillo-cuarto día de extracción	345660	21600	3600	41.19	9517.04	4	4.008
	25	20	Roca	D4-AM6	Amarillo-cuarto día de extracción	345720	21600	3600	41.19	9518.68	4	4.008

Fecha de inicio de la calibración	Temperatura de trabajo (°C)	Humedad de trabajo (%H)	Fuente emanadora de radón	Código de dispositivo de muestreo	Color de etiqueta de muestreo	ts (s) (periodo de exposición del dispositivo)	td (s) (tiempo transcurrido desde la finalización de la exposición y el inicio del conteo)	tc (s) (periodo de conteo)	Conteo blanco (CPM)	Conteo del dispositivo (CPM)	pa (g) (peso del dispositivo antes de la exposición)	pd (g) (peso del dispositivo después de la exposición)
	25	20	Roca	D5-NG1	Negro-quinto día de extracción	367200	21600	3600	41.19	10107.86	4	4.009
	25	20	Roca	D5-NG2	Negro-quinto día de extracción	367260	21600	3600	41.19	10109.51	4	4.009
	25	20	Roca	D5-NG3	Negro-quinto día de extracción	367320	21600	3600	41.19	10111.15	4	4.009
	25	20	Roca	D5-NG4	Negro-quinto día de extracción	432000	21600	3600	41.19	11885.27	4	4.01
	25	20	Roca	D5-NG5	Negro-quinto día de extracción	432060	21600	3600	41.19	11886.92	4	4.01
	25	20	Roca	D5-NG6	Negro-quinto día de extracción	432120	21600	3600	41.19	11888.56	4	4.01
	25	20	Roca	D6-RJ1	Rojo-sexto día de extracción	453600	21600	3600	41.19	12477.74	4	4.011
	25	20	Roca	D6-RJ2	Rojo-sexto día de extracción	453660	21600	3600	41.19	12479.39	4	4.011
	25	20	Roca	D6-RJ3	Rojo-sexto día de extracción	453720	21600	3600	41.19	12481.03	4	4.011
	25	20	Roca	D6-RJ4	Rojo-sexto día de extracción	518400	21600	3600	41.19	14255.15	4	4.012
	25	20	Roca	D6-RJ5	Rojo-sexto día de extracción	518460	21600	3600	41.19	14256.8	4	4.012
	25	20	Roca	D6-RJ6	Rojo-sexto día de extracción	518520	21600	3600	41.19	14258.44	4	4.012
	25	20	Roca	D7-MR1	Morado-septimo día de extracción	540000	21600	3600	41.19	14847.62	4	4.013
	25	20	Roca	D7-MR2	Morado-septimo día de extracción	540060	21600	3600	41.19	14849.27	4	4.013
	25	20	Roca	D7-MR3	Morado-septimo día de extracción	540120	21600	3600	41.19	14850.91	4	4.013
	25	20	Roca	D7-MR4	Morado-septimo día de extracción	604800	21600	3600	41.19	16625.03	4	4.014
	25	20	Roca	D7-MR5	Morado-septimo día de extracción	604860	21600	3600	41.19	16626.68	4	4.014
	25	20	Roca	D7-MR6	Morado-septimo día de extracción	604920	21600	3600	41.19	16628.32	4	4.014

Figura 5.25: Pantalla de registro para los datos de calibración de la metodología.

5.3.2 Calculo de la velocidad de exhalación.

Para realizar el cálculo de velocidad de exhalación, primero debemos de exportar los datos generados en la calibración. Estos datos de interés se muestran en la Figura 5.26.

Día de exposición	Código de dispositivo de medición	ts (s) (periodo de exposición del dispositivo)	td (s) (tiempo transcurrido desde la finalizacion de la exposición y el inicio del conteo)	tc (s) (periodo de conteo)	Conteo blanco (CPM)	Conteo del dispositivo (CPM)	pa (g) (peso del dispositivo antes de exposición)	pd (g) (peso del dispositivo después de exposición)
Primero	D1-AN1	21600	21600	3600	41.19	628.34	4	4
	D1-AN2	21660	21600	3600	41.19	629.99	4	4.001
	D1-AN3	21720	21600	3600	41.19	631.63	4	4.001
	D1-AN4	86400	21600	3600	41.19	2405.75	4	4.002
	D1-AN5	86460	21600	3600	41.19	2407.4	4	4.002
	D1-AN6	86520	21600	3600	41.19	2409.04	4	4.002
Segundo	D2-AZ1	108000	21600	3600	41.19	2998.22	4	4.003
	D2-AZ2	108060	21600	3600	41.19	2999.87	4	4.003
	D2-AZ3	108120	21600	3600	41.19	3001.51	4	4.003
	D2-AZ4	172800	21600	3600	41.19	4775.63	4	4.004
	D2-AZ5	172860	21600	3600	41.19	4777.28	4	4.004
	D2-AZ6	172920	21600	3600	41.19	4778.92	4	4.004
Tercero	D3-VD1	194400	21600	3600	41.19	5368.1	4	4.005
	D3-VD2	194460	21600	3600	41.19	5369.75	4	4.005
	D3-VD3	194520	21600	3600	41.19	5371.39	4	4.005
	D3-VD4	259200	21600	3600	41.19	7145.51	4	4.006
	D3-VD5	259260	21600	3600	41.19	7147.16	4	4.006
	D3-VD6	259320	21600	3600	41.19	7148.8	4	4.006
Cuarto	D4-AM1	280800	21600	3600	41.19	7737.98	4	4.007
	D4-AM2	280860	21600	3600	41.19	7739.63	4	4.007
	D4-AM3	280920	21600	3600	41.19	7741.27	4	4.007
	D4-AM4	345600	21600	3600	41.19	9515.39	4	4.008
	D4-AM5	345660	21600	3600	41.19	9517.04	4	4.008
	D4-AM6	345720	21600	3600	41.19	9518.68	4	4.008
Quinto	D5-NG1	367200	21600	3600	41.19	10107.86	4	4.009
	D5-NG2	367260	21600	3600	41.19	10109.51	4	4.009
	D5-NG3	367320	21600	3600	41.19	10111.15	4	4.009
	D5-NG4	432000	21600	3600	41.19	11885.27	4	4.01
	D5-NG5	432060	21600	3600	41.19	11886.92	4	4.01
	D5-NG6	432120	21600	3600	41.19	11888.56	4	4.01
Sexto	D6-RJ1	453600	21600	3600	41.19	12477.74	4	4.011
	D6-RJ2	453660	21600	3600	41.19	12479.39	4	4.011
	D6-RJ3	453720	21600	3600	41.19	12481.03	4	4.011
	D6-RJ4	518400	21600	3600	41.19	14255.15	4	4.012
	D6-RJ5	518460	21600	3600	41.19	14256.8	4	4.012
	D6-RJ6	518520	21600	3600	41.19	14258.44	4	4.012
Septimo	D7-MR1	540000	21600	3600	41.19	14847.62	4	4.013
	D7-MR2	540060	21600	3600	41.19	14849.27	4	4.013
	D7-MR3	540120	21600	3600	41.19	14850.91	4	4.013
	D7-MR4	604800	21600	3600	41.19	16625.03	4	4.014
	D7-MR5	604860	21600	3600	41.19	16626.68	4	4.014
	D7-MR6	604920	21600	3600	41.19	16628.32	4	4.014

Figura 5.26: Pantalla de datos exportados de la calibración de la metodología.

Seguidamente se calculan los promedios de cada extracción reduciendo el número de datos de 14, a 2 por cada día de exposición, los resultados de estas acciones se muestran en la Figura 2.27.

Día de exposición	ts (prom)	td (prom)	te (prom)	Conteo blanco (prom) (min)	Conteo blanco (prom) (s)	Conteo del dispositivo (prom) (min)	Conteo del dispositivo (CPS)	Δp	Δp (prom)	N (s^{-1}) (cuentas netas)
Primero	21660	21600	3600	41.1900	0.6865	629.165	10.48608333	0 0.001 0.001 0.002	0.000666667	9.7996
	86460	21600	3600	41.1900	0.6865	2406.575	40.10958333	0.002 0.002 0.003	0.002	39.4231
Segundo	108060	21600	3600	41.1900	0.6865	2999.045	49.98408333	0.003 0.003 0.004	0.003	49.2976
	172860	21600	3600	41.1900	0.6865	4776.455	79.60758333	0.004 0.004 0.005	0.004	78.9211
Tercero	194460	21600	3600	41.1900	0.6865	5368.925	89.48208333	0.005 0.005 0.006	0.005	88.7956
	259260	21600	3600	41.1900	0.6865	7146.335	119.10558333	0.006 0.006 0.007	0.006	118.4191
Cuarto	280860	21600	3600	41.1900	0.6865	7738.805	128.98008333	0.007 0.007 0.008	0.007	128.2936
	345660	21600	3600	41.1900	0.6865	9516.215	158.60358333	0.008 0.008 0.009	0.008	157.9171
Quinto	367260	21600	3600	41.1900	0.6865	10108.685	168.47808333	0.009 0.009 0.01	0.009	167.7916
	432060	21600	3600	41.1900	0.6865	11886.095	198.10158333	0.01 0.01 0.01	0.01	197.4151
Sexto	453660	21600	3600	41.1900	0.6865	12478.565	207.97608333	0.011 0.011 0.012	0.011	207.2896
	518460	21600	3600	41.1900	0.6865	14255.975	237.59958333	0.012 0.012 0.013	0.012	236.9131
Septimo	540060	21600	3600	41.1900	0.6865	14948.445	247.47408333	0.013 0.013 0.014	0.013	246.7876
	604860	21600	3600	41.1900	0.6865	16625.855	277.09758333	0.014 0.014 0.014	0.014	276.4111

Figura 2.27: Pantalla de promedios de datos por extracción de dispositivos de muestreo.

Después mediante las ecuaciones 4.4 y 4.7 se obtienen la velocidad de exhalación superficial de radón proveniente de la fuente de exhalación (roca con contenido de uranio). Algunos parámetros que utilizan las ecuaciones anteriores y las siguientes son necesarios fijarlos al inicio para que después solo sean tomados por el programa para el cálculo correspondiente; la densidad aparente del carbón activado es el valor que se obtuvo en la sección 5.2.1.3, la constante de decaimiento del radón y el tiempo de vida media se leen en la Tabla 2.2, el volumen del contenedor de acumulación es aproximadamente el del recipiente que se muestra en la Figura 5.1, el área superficial de exhalación es aproximadamente el de las rocas de uranio mostradas en la Figura 5.1, las cuentas por segundo del blanco se leen en la Tabla 5.1, las cuentas por segundo del patrón y la actividad son tomadas del trabajo de graduación realizado por Morales et al (2019), en donde se preparó un patrón con actividad de 1 Bq/L del patrón NIST-01 y se obtuvo una lectura de 1.67 cuentas por segundo en el equipo de centelleo líquido con el que cuenta el CIAN-FIA-UES. (El patrón utilizado en el cálculo de la eficiencia puede ser un patrón en solución ya que la eficiencia que requiere la metodología es solo la eficiencia de conteo del detector (equipo de centelleo líquido)).

Densidad aparente carbón activado [g/mL]	0.45	Densidad aparente carbón activado [g/m ³]	450000
cps patrón	1.67		
cps blanco	0.6865		
Actividad patrón [Bq]	1		
		ϵ [s ⁻¹ Bq ⁻¹] (Eficiencia de conteo del detector)	0.9835
λ [s ⁻¹] (Constante de decaimiento del Rn ²²²)	2.0984E-06		
t _{1/2} [s]	330324.48		
A [m ²] (Superficie de exhalación)	0.0016		
Volumen del contenedor de acumulación [m ³]	0.01864		

Figura 5.28: Pantalla de parámetros necesarios para realizar los cálculos de velocidad de exhalación, concentración de radón, factor de calibración y coeficiente de adsorción de radón en carbón activado.

Como se puede observar en la columna donde aparecen los resultados de la velocidad de exhalación superficial para la serie de datos generados para la prueba piloto en la Figura 5.29, esta aumenta conforme el tiempo de exposición aumenta desde un valor igual a 0.308895088 Bq/ m²s hasta un valor igual a 0.538482999 Bq/ m²s.

Dia de exposición	Velocidad de exhalación superficial (Bq/m ² s)
Primero	0.308895088
	0.332786725
Segundo	0.340329069
	0.363341942
Tercero	0.371184434
	0.395282906
Cuarto	0.403510225
	0.428780258
Quinto	0.437399147
	0.463836929
Sexto	0.472841347
	0.500420501
Septimo	0.509799591
	0.538482999

Figura 5.29 : Pantalla donde se muestran los resultados para la velocidad de exhalacion superficial para la calibracion de la metodologia.

5.3.3 Calculo de la concentración de radón dentro de la cámara de calibración (C_{Rn}).

Posteriormente se procede al cálculo de la concentración de radón dentro de la cámara de calibración. Estableciendo un tiempo inicial con concentración igual a cero. Para realizar este cálculo se hace uso de la Ecuación 4.5.

Como se puede observar en la columna para la concentración de radón (Rn^{222}) dentro de la cámara para la serie de datos generados para la prueba piloto (véase la Figura 5.30), esta aumenta conforme el tiempo de exposición de los dispositivos dentro de la cámara de calibración desde un valor igual a 561.4502 Bq/m^3 hasta un valor igual a $15836.4969 \text{ Bq/m}^3$.

Día de exposición	Velocidad de exhalación superficial ($\text{Bq/m}^2 \cdot \text{s}$)	Concentración en la cámara (Bq/m^3)	Concentración en la cámara (Bq/m^3)
Primero	0.308895088	561.4502458	561.4502
	0.332786725	2258.677647	2258.6776
Segundo	0.340329069	2824.420115	2824.4201
	0.363341942	4521.647516	4521.6475
Tercero	0.371184434	5087.389983	5087.3900
	0.395282906	6784.617385	6784.6174
Cuarto	0.403510225	7350.359852	7350.3599
	0.428780258	9047.587254	9047.5873
Quinto	0.437399147	9613.329721	9613.3297
	0.463836929	11310.55712	11310.5571
Sexto	0.472841347	11876.29959	11876.2996
	0.500420501	13573.52639	13573.5270
Septimo	0.509799591	14139.26946	14139.2695
	0.538482999	15836.49686	15836.4969

Figura 5.30: Pantalla donde se muestran los resultados para la concentración de radón (Rn^{222}) dentro de la cámara de calibración.

5.3.4 Cálculo del factor de calibración (CF).

Uno de los parámetros más importantes dentro de la metodología es el factor de calibración (CF), el programa nos genera estos valores puntuales para cada prome-

dio de los datos generados por la función *TENDENCIA*, el cálculo de los valores el programa lo realiza aplicando las Ecuaciones 4.6 y 4.8, para luego con estos valores obtener las ecuaciones y gráficos correspondientes.

Como se puede observar en la columna del factor de calibración para la serie de datos generados para la prueba piloto (véase la Figura 5.31), este valor disminuye conforme el cambio de peso de los dispositivos aumenta, desde un valor de $8.77023\text{E-}07$ m^3/s hasta un valor de $5.79026\text{E-}08$ m^3/s .

Día de exposición	t(s)	DF	CF (factor de calibración)(m^3/s)
Primero	32430.0000	0.934226746	8.77023E-07
	64830.0000	0.872834545	2.35166E-07
Segundo	75630.0000	0.853280465	1.92471E-07
	108030.0000	0.797207605	1.28782E-07
Tercero	118830.0000	0.779347793	1.17101E-07
	151230.0000	0.728133378	9.40103E-08
Cuarto	162030.0000	0.711821033	8.8769E-08
	194430.0000	0.665044102	7.72009E-08
Quinto	205230.0000	0.650145144	7.43255E-08
	237630.0000	0.607421211	6.7622E-08
Sexto	248430.0000	0.593813176	6.58782E-08
	280830.0000	0.554791067	6.16989E-08
Septimo	291630.0000	0.542362104	6.05886E-08
	324030.0000	0.506721074	5.79026E-08

Figura 5.31: Pantalla donde se muestran los resultados para el factor de calibración (CF).

5.3.5 Calculo del coeficiente de adsorción de radón en carbón activado K(t).

El coeficiente de adsorción es un parámetro que caracteriza la capacidad del carbón activo de adsorber el radón (Rn^{222}) el cual es función del tiempo, la humedad y la temperatura. Para realizar los cálculos correspondientes a esta sección se emplea la Ecuación 4.9. El programa generará la columna de resultados para el coeficiente de adsorción para cada uno de las muestras de los dispositivos de muestreo, resultando un valor promedio para el lote de carbon activo de $2.22072 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{g}$ (este valor se calculó mediante la opción Análisis de datos de Microsoft Excel y para mayor información estadística del coeficiente de adsorción veáse la Figura 5.33)

Día de exposición	Q(t) (Bq/g)	Ca (Bq/m ³)	K(t) (coeficiente de adsorción de radón en carbón activado) (m ³ /g)
Primero	0.001247667	564	2.21218E-06
	0.005019284	2262	2.21896E-06
Segundo	0.006276489	2826	2.22098E-06
	0.010048106	4523	2.22156E-06
Tercero	0.011305311	5089	2.22152E-06
	0.015076928	6786	2.22177E-06
Cuarto	0.016334133	7353	2.22142E-06
	0.020105749	9051	2.22138E-06
Quinto	0.021362955	9616	2.22161E-06
	0.025134571	11314	2.22155E-06
Sexto	0.026391777	11879	2.22172E-06
	0.030163393	13576	2.22182E-06
Septimo	0.031420599	14142	2.22179E-06
	0.035192215	15839	2.22187E-06

Figura 5.32: Pantalla donde se muestran los resultados para calcular el coeficiente de adsorción K(t) para el lote de carbón activo, utilizado en la calibración.

Media	2.22072E-06
Error típico	6.86176E-10
Mediana	2.22155E-06
Moda	#N/A
Desviación estándar	2.56744E-09
Varianza de la muestra	6.59172E-18
Curtosis	11.24094564
Coefficiente de asimetría	-3.291272286
Rango	9.69512E-09
Mínimo	2.21218E-06
Máximo	2.22187E-06
Suma	3.10901E-05
Cuenta	14
Nivel de confianza(95.0%)	1.48239E-09

Figura 5.33: Estadística descriptiva del set de datos obtenidos del coeficiente de adsorción de gas radón en carbón activado.

5.3.6 Gráficos generados para los cálculos de calibración.

Posteriormente al ingreso de datos y cálculos para la calibración, se pueden generar algunos gráficos con los cuales se puede visualizar de una mejor manera la tendencia generada por los datos para estos parámetros como los son para el factor de calibración y el coeficiente de adsorción.

En el primer gráfico se representa el factor de calibración versus el cambio de peso en gramos de los dispositivo de muestreo, observándose una tendencia potencial con función obtenida de $1E-09\Delta P^{-0.864}$ y un R^2 de 0.9789 (véase la Figura 5.34). En el segundo gráfico se visualizan los datos del coeficiente de adsorción $K(t)$ versus el tiempo de exposición promedio de cada set de datos, mostrando una tendencia logarítmica de los datos (véase la Figura 5.35).

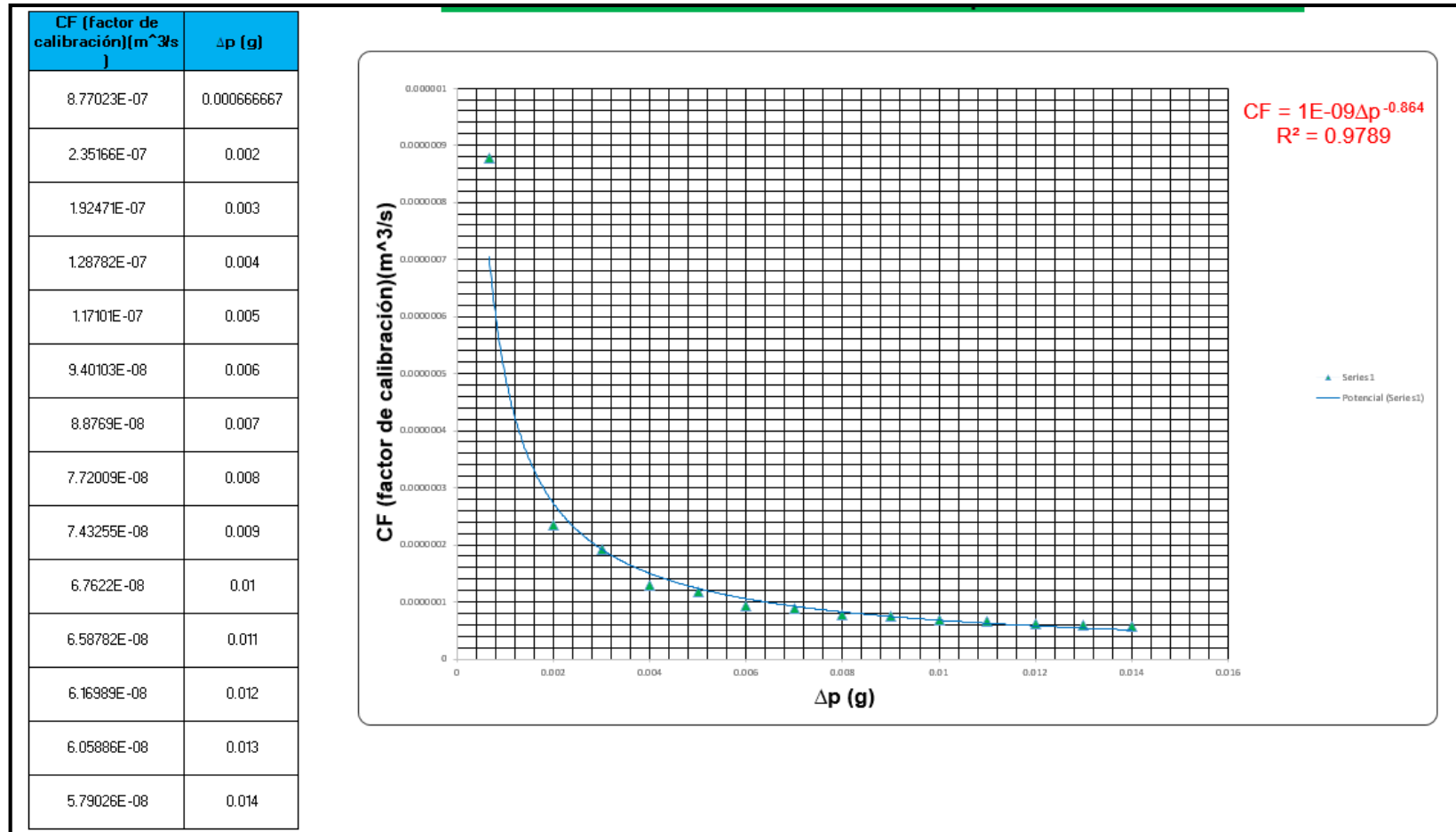


Figura 5.34: Tabla de factor de calibración y diferencia de peso de los dispositivos de muestreo (izquierda) y gráfico del factor de calibración (CF) versus el cambio de peso promedio (ΔP) para la tendencia de datos de la prueba piloto (derecha).

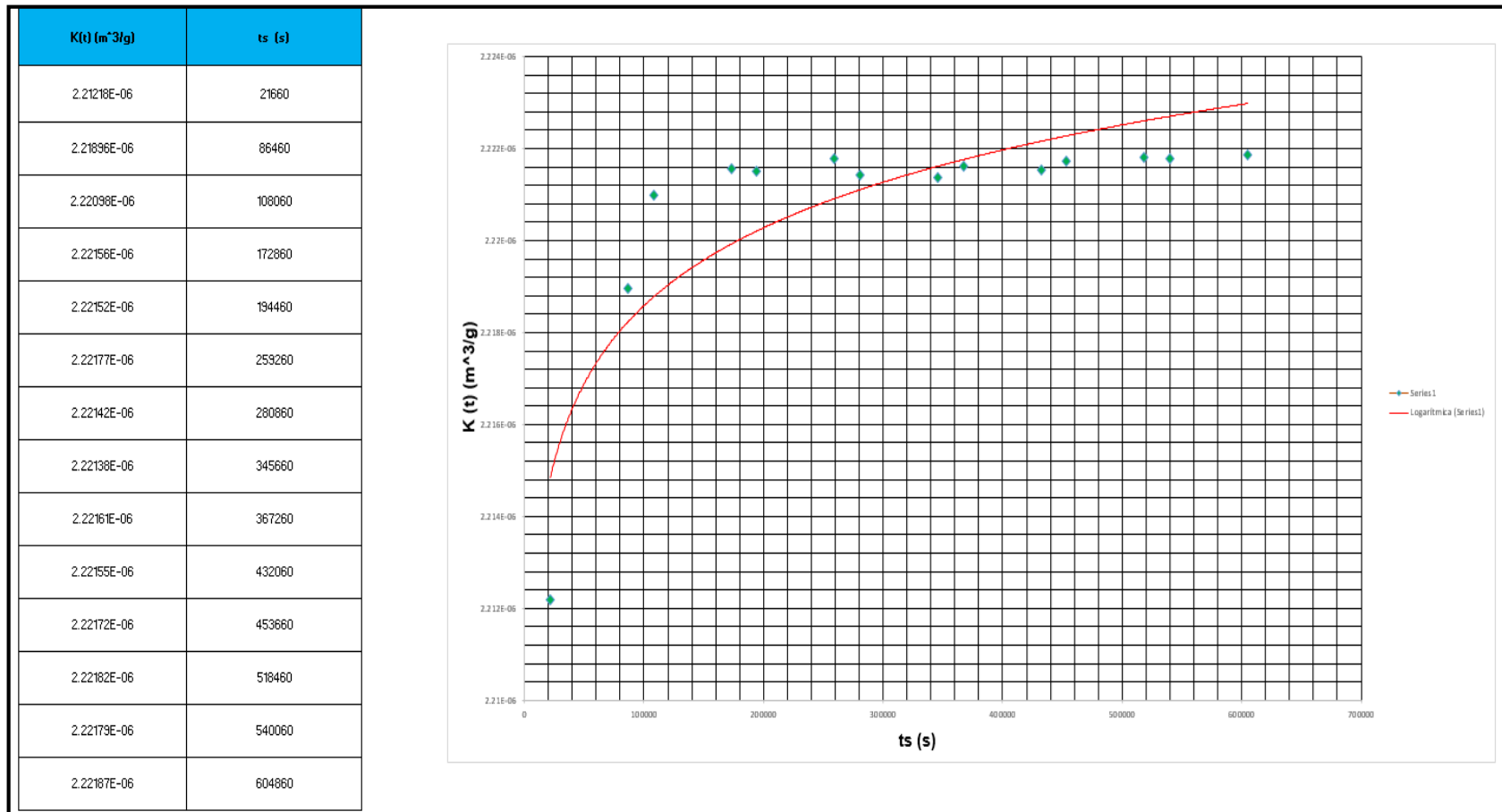


Figura 5.35: Tabla de coeficiente de adsorción y tiempo de exposición (izquierda) y gráfico del coeficiente de adsorción $K(t)$ versus el tiempo de exposición promedio de los dispositivos (t_s) (derecha) generados para la tendencia de datos de la prueba piloto.

5.4 MUESTREO EN VIVIENDAS Y EDIFICIOS (ESPACIOS CERRADOS).

El programa luego de la calibración de la metodología permite realizar los respectivos muestreos de concentración de radón (Rn^{222}) para espacios cerrados como lo son para viviendas y edificios. A continuación en la Figura 5.36 se presenta la pantalla que se utiliza para este tipo de muestreos.

En la pantalla se observan los datos necesarios para el llenado del formulario del muestreo en espacios cerrados

Muestreo lugares de trabajo o viviendas



Fecha de inicio de la medición	<input type="text"/>	
Fecha de finalización de la medición	<input type="text"/>	
Hora de inicio de la medición	<input type="text"/>	Hora de finalización de la medición <input type="text"/>
Código de dispositivo de medición	<input type="text"/>	Nombre del muestreo <input type="text"/>
Tipo de edificio donde se realizó la medición	<input type="text"/>	pa(g) (peso del dispositivo antes de la medición): <input type="text"/>
Piso del edificio o vivienda donde se realizó la medición	<input type="text"/>	pd(g) (peso del dispositivo después de la medición): <input type="text"/>
Cuarto donde se realizó la medición	<input type="text"/>	
Hubo ventilación de puertas y ventanas durante la medición	<input type="text"/>	
Observaciones	<input type="text"/>	

Figura 5.36: Pantalla de captura de datos para muestreo en espacios cerrados.

5.5 MUESTREO EN ESTUDIOS AMBIENTALES.

El programa KEMRADÓN-CIAN también permite generar cálculos para estudios ambientales en lugares como cuevas turísticas, campos geotérmicos, balnearios y establecimientos termales. A continuación en la Figura 5.37, se presenta la ventana con los datos requeridos para dichos estudios.

Ingresar Datos Muestreo En Estudios Ambientales

Fecha de inicio de la medición

Hora de inicio de la medición

Fecha de finalización de la medición

Hora de finalización de la medición

Nombre de la persona que realiza la medición

Código de dispositivo de muestreo

Época del año donde se realizó la medición

Tipo de estudio ambiental

pa (g) (peso del dispositivo antes del muestreo):

pd (g) (peso del dispositivo después del muestreo):

Observaciones

Agregar **Limpiar**

KEMRADÓN
CIAN-PIA-UES

Figura 5.37: Pantalla de captura de datos para muestreo en estudios ambientales.

5.6 RESULTADOS PARA LOS DISTINTOS ESTUDIOS DE MUESTREO.

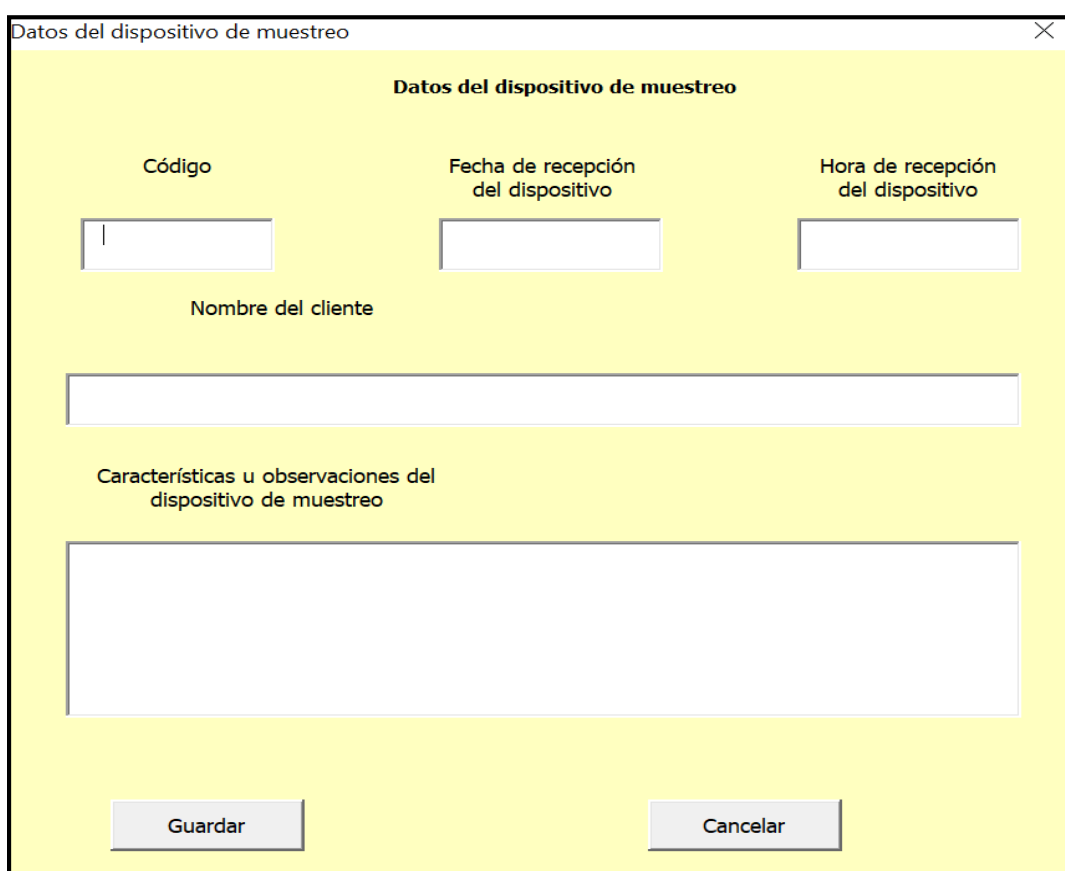
Luego del ingreso de los distintos datos requeridos para el estudio que se desee evaluar, el programa genera una serie de valores para parámetros de interés y posteriores conclusiones con estos resultados, teniendo principal relevancia el cálculo de la concentración de radón (Rn^{222}) de cada uno de los dispositivos de muestreo. En la Figura 5.38 se muestra la pantalla de ingreso de datos necesarios para calcular la concentración de radón muestreada.

The screenshot shows a software window titled "Calculo de concentración de radón". On the left side, there is a list of input fields with labels: "Tipo de muestreo" (dropdown), "Código de dispositivo de muestreo" (text), "N (s⁻¹) (cuentas netas):" (text), "ts (s) (tiempo de exposición):" (text), "ε (s⁻¹*Bq⁻¹) (eficiencia del detector):" (text), "td (s) (tiempo transcurrido desde la finalización de la exposición y el inicio del conteo):" (text), "CF (m³/s)(factor de calibración):" (text), "DF (factor de decaimiento):" (text), and "CRn (Bq/m³) (Concentración de radón):" (text). The last three fields have yellow highlights. On the right side, there is a green box containing the formula: $CRn = (N) / (ts * \epsilon * CF * DF)$. Below the formula is a diagram of a house with arrows indicating radon gas entering from the ground. The ground is labeled with "RADON", "RADIUM", and "URANIUM". At the bottom of the interface, there are three buttons: "Guardar" (blue), "Limpiar" (blue), and "Calcular" (green).

Figura 5.38 : Pantalla de resultados del cálculo de la concentración de radón (Rn^{222}) para cada uno de los estudios en espacios cerrados y ambientales.

5.7 INFORME FINAL.

Después de ingresados y realizados los cálculos correspondientes a la metodología, el programa KEMRADÓN-CIAN permite recopilar la información más relevante del dispositivo muestreado por medio de los formularios presentados en las Figuras 5.39, 5.40 y 5.41.



The image shows a software window titled "Datos del dispositivo de muestreo" with a close button (X) in the top right corner. The window has a yellow background and contains the following fields and controls:

- Código:** A text input field with a vertical cursor on the left.
- Fecha de recepción del dispositivo:** A date input field.
- Hora de recepción del dispositivo:** A time input field.
- Nombre del cliente:** A wide text input field.
- Características u observaciones del dispositivo de muestreo:** A large text area for notes.
- Guardar:** A button at the bottom left.
- Cancelar:** A button at the bottom right.

Figura 5.39: Formulario de ingreso de los datos generales del dispositivo de muestreo.

Datos del muestreo

Datos del muestreo

Fecha de inicio de muestreo Hora de inicio de muestreo

Fecha de finalización de muestreo Hora de finalización de muestreo

Nombre de la persona que realizo el muestreo

Tipo de muestreo

Observaciones

Figura 5.40: Formulario de ingreso de los datos del muestreo.

Datos de la medición

Resultados de la medición

Temperatura de calibración (°C) Humedad de calibración (%H)

CF (Factor de calibración) (m³/s) Concentración de radón (Bq/m³)

Observaciones

Fecha de emisión

Figura 5.41: Formulario de ingreso de los resultados de la medición

Luego el programa muestra un informe como el de la Figura 5.42 que puede ser impreso, en el cual se detalla la información principal del dispositivo muestreado y analizado y finalmente en la Figura 5.43 se presenta una esquematización del funcionamiento del programa KEMRADÓN-CIAN

Datos del dispositivo de muestreo	
Código	Fecha de recepción del dispositivo
	Hora de recepción del dispositivo
Nombre del cliente	
Características u observaciones del dispositivo de muestreo	
Datos del muestreo	
Fecha de inicio de muestreo	Hora de inicio de muestreo
Fecha de finalización de muestreo	Fecha de finalización de muestreo
Nombre de la persona que realizo el muestreo	
Tipo de muestreo	
Observaciones	
Resultados de la medición	
Temperatura de calibración (°C)	Humedad de calibración (%H)
CF (Factor de calibración)(m ³ /s)	Concentración de radón (Bq/m ³)
Observaciones	
Firma del responsable	Fecha de emisión

Figura 5.42: Informe final del dispositivo muestreado.

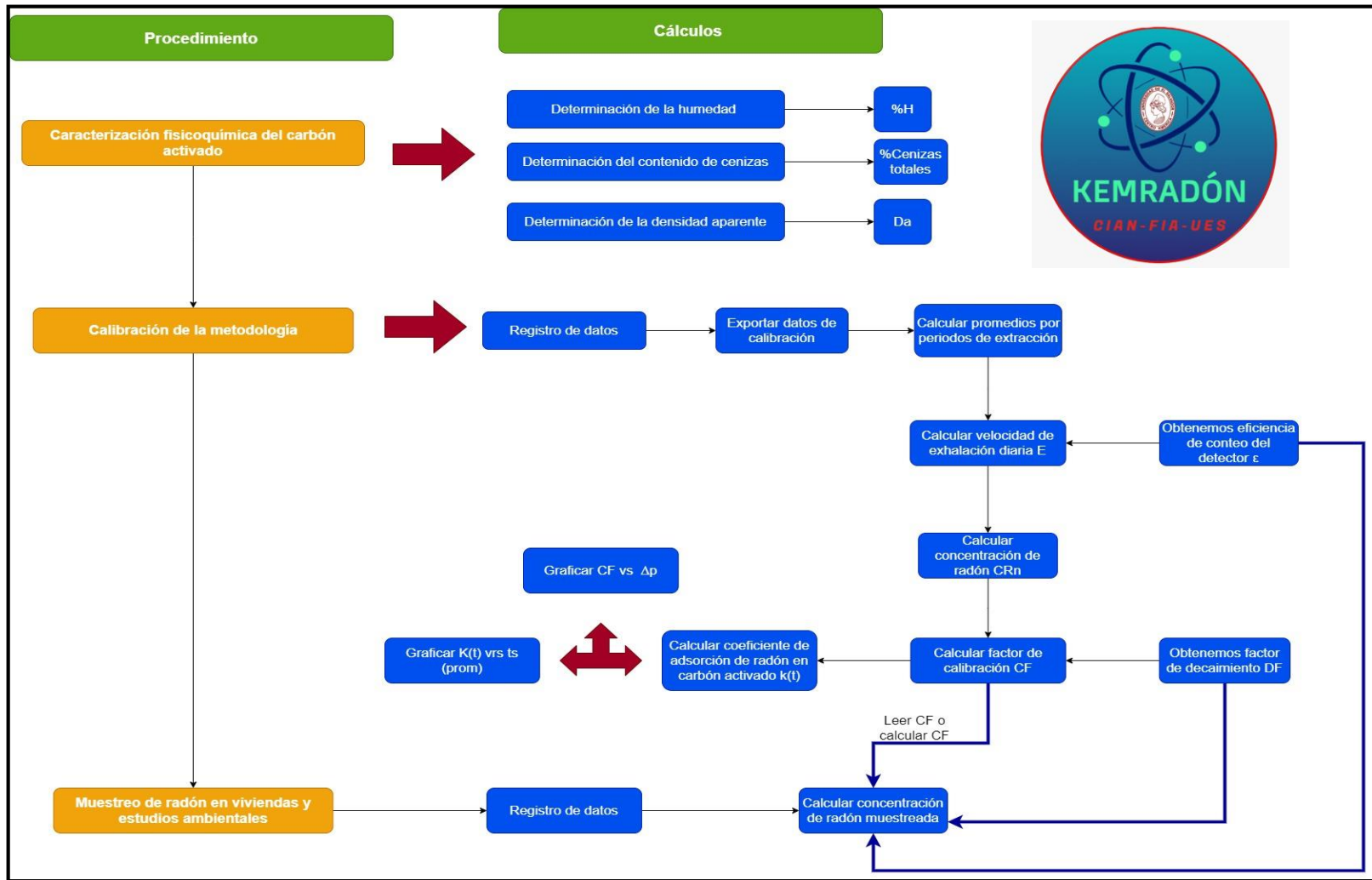


Figura 5.43: Esquema general del funcionamiento del programa KEMRADÓN-CIAN.

5.8 PROTOCOLO DE EVALUACIÓN DE METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIONES DE GAS RADÓN ($Rn222$), EN RECINTOS CERRADOS Y ESTUDIOS AMBIENTALES APLICANDO CENTELLEO LÍQUIDO.

En el presente protocolo se presentan las consideraciones generales para la evaluación de la metodología propuesta, se describe de manera detallada el proceso de evaluación de algunos parámetros estadísticos que generen la fiabilidad del método, junto con lo anterior se detalla el procesamiento estadístico y criterios de aceptación una vez determinados los parámetros.

1. **Objetivo del protocolo:** Evaluar mediante algunos parámetros estadísticos la metodología para estimación de concentraciones de gas radón en recintos cerrados y estudios ambientales
2. **Alcance:** La evaluación de la metodología para estimación de concentraciones de gas radón en recintos cerrados y estudios ambientales, se llevará a cabo en el sistema dispositivo de muestreo de gas radón en carbón activado y técnica de centelleo líquido.
3. **Responsables:**
 - a. Mainor Stanley Córdova Vásquez
 - b. Moisés Elías Gómez Miguel
 - c. Kayla Reyes De Henrriquez.

4. **Parámetros a estudiar:**

Los parámetros a evaluar son:

- A. Linealidad del método
- B. Robustez del método

5. Muestras:

Dispositivos de muestreo de gas radón en carbón activado.

6. Equipos involucrados:

- a. Equipo de centelleo líquido
- b. Cámara de calibración

7. Nombre del método:

Metodología para estimación de concentraciones de gas radón en recintos cerrados y estudios ambientales.

8. Descripción del método:

La metodología consiste en la exposición de dispositivos de muestreo de carbón activado a una fuente de radón dentro de una cámara de calibración con condiciones de humedad y temperatura controlada, después de la exposición se hace un conteo de la presencia de radón en carbón activado en un equipo de centelleo líquido.

9. Materiales

- a. Viales de vidrio fabricados de borosilicato de bajo contenido de K-40 de 20 mL (especificaciones requeridas para centelleo líquido)
- b. Beakers
- c. Pipetas
- d. Cristalería

10. Linealidad del método.

A. Procedimiento de determinación de la linealidad de la metodología.

La linealidad se define como la habilidad del método para obtener resultados de la prueba proporcionales a la concentración del analito (Eurachem, 2005); en el método evaluado el analito es el radón adsorbido por el carbón activado en donde la determinación de su linealidad se realiza tomando como referencia los datos generados en la calibración del método, para ello se siguen los siguientes pasos:

1. Se grafica la respuesta (eje Y, Conteos (s^{-1}) de los datos obtenidos en la calibración) en función de la Concentración de radón en la cámara de referencia (eje X). El gráfico obtenido se muestra en la Figura 5.44.

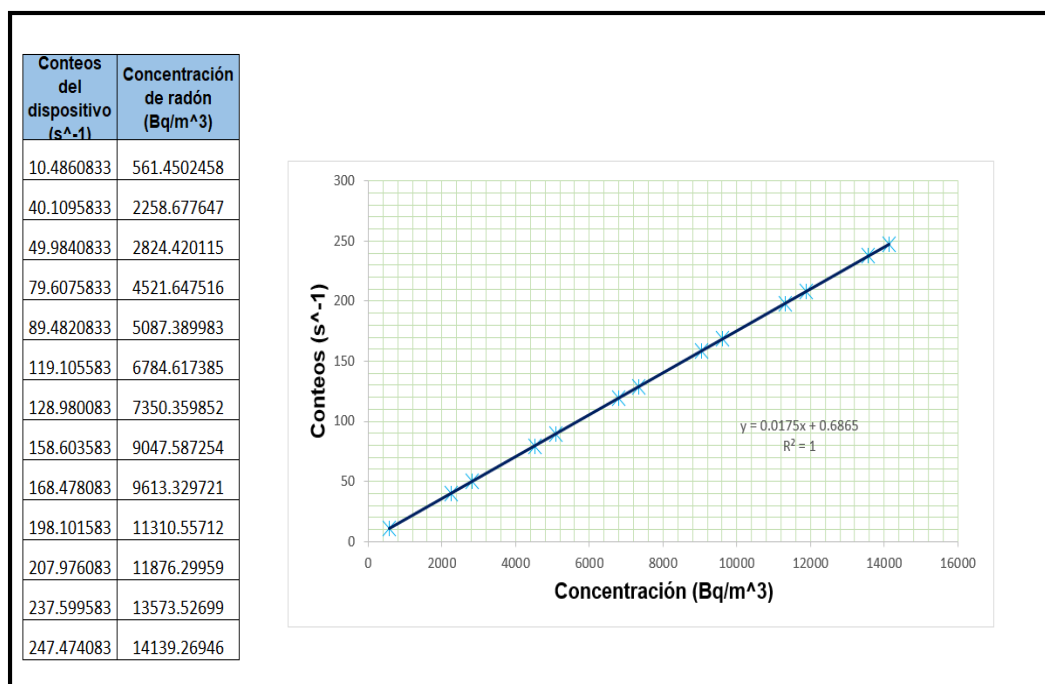


Figura.5.44: Tabla de conteos del dispositivo y concentración de radón (izquierda) y gráfico de conteos versus la concentración de radón generados en la Plantilla del programa KEMRADÓN-CIAN (derecha).

2. Se calcula las estadísticas de regresión apropiada (regresión lineal por mínimos cuadrados)

Criterios de aceptación de la linealidad

- a. Comportamiento lineal en la gráfica de Conteos vs Concentración.
- b. Coeficiente de correlación $r > 0.999$

B. Límite de detección y cuantificación.

El límite de detección (LOD) se define como el menor contenido que puede medirse con una certeza estadística razonable o como la menor concentración del analito en una muestra que puede detectarse, pero no necesariamente cuantificarse bajo las condiciones establecidas de la prueba (Eurachem, 2005) (Y_{LOD}). Si se analiza un blanco de la muestra varias veces y se obtiene la señal media (\bar{Y}_o) y su desviación estándar $S_{\bar{y}_o}$, las señales mayores a los valores de la Ecuación 5.1 se ubicarían fuera de la gaussiana del blanco analítico y podríamos asignarlas a la presencia de analito (Jurado, 2008).

$$Y_{LOD} = \bar{Y}_o \pm 3 S_{\bar{y}_o} \quad \text{Ec. 5.1}$$

Si se cuenta con una recta de calibrado de ecuación $y = bx + a$, el LOD se calcularía como:

$$X_{LOD} = \frac{Y_{LOD} - a}{b} \quad \text{Ec. 5.2}$$

En tanto el límite de cuantificación (LOQ) se define como la menor concentración de un analito que puede determinarse con una precisión y una exactitud aceptables bajo las condiciones establecidas de la prueba (Eurachem, 2005). La IUPAC propone como LOQ al valor de:

$$Y_{LOQ} = \bar{Y}_o \pm 10 S_{\bar{y}_o} \quad \text{Ec. 5.3}$$

I. Procedimiento para calcular el LOD y LOQ.

1. Se preparan 10 blancos de carbón activado en viales de vidrio, medidos una vez cada uno.
2. Se miden las cuentas por minuto de cada vial en el equipo de centelleo líquido teniendo en cuenta el procedimiento para tal medición, las cuentas por minuto se convierten a cuentas por segundo y se agrupan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Cuentas por segundo de diez blancos de carbón activado.

Blanco	
Cuentas (s ⁻¹)	
CRn	Yo
0	0.686
0	0.681
0	0.687
0	0.681
0	0.679
0	0.685
0	0.684
0	0.683
0	0.682
0	0.681

3. Se calcula el promedio y la desviación estándar de las cuentas por segundo de las 10 mediciones, por medio de las funciones *PROMEDIO* Y *DESVEST* de Excel, obteniendo los siguientes resultados.

Ȳ _o	0.6829
SȲ _o	0.00255821

Figura 5.45: Valores del promedio y desviación estándar de los 10 blancos de carbón activado.

4. Después se calcula por medio de las Ecuaciones 5.1 y 5.3 el *LOD* y *LOQ* teniendo como resultado los siguientes datos.

Y_{LOD}	0.69057463
Y_{LOQ}	0.70848211

Figura 5.46: Valores de LOD y LOQ de los 10 blancos de carbón activado.

5. Finalmente para obtener tanto el *LOQ* y *LOD* en valores de concentraciones se utiliza la ecuación que se obtuvo en la determinación de la linealidad.

$$y=0.0175 x+0.6865$$

Donde:

Y = Conteos

X = Concentración

0.6865 = Conteos que se obtiene a una concentración de radón en carbón activado igual a cero (medida en blanco).

Se sustituyen los valores de Y_{LOD} y Y_{LOQ} de la siguiente manera y finalmente se calculan las concentraciones de radón.

$$0.69057 = 0.0175 x + 0.6865$$

$$x = 0.6232$$

$$C_{Rn} = 0.6232 \text{ Bq/m}^3$$

Concentración mínima de radón que puede ser detectada, pero no cuantificada.

$$0.70848 = 0.0175 x + 0.6865$$

$$x = 1.256$$

$$C_{Rn} = 1.256 \text{ Bq/m}^3$$

Concentración mínima de radón que puede ser cuantificada.

11. Robustez del método.

La robustez de un procedimiento analítico es una medida de su capacidad para permanecer inalterado por pequeñas variaciones premeditadas de los parámetros del método (Eurachem, 2005).

Procedimiento para determinar la robustez.

1. Se fija el factor a modificar (carbón activado de diferente proveedor pero igual origen).
2. Se realiza una prueba dentro de la cámara de calibración, exponiendo seis dispositivos de muestreo a una fuente de radón, según la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Distribución del tipo de carbón activado utilizado en la prueba de robustez del método

N° de dispositivo	Tipo de carbón activado	Tiempo de exposición (h)
1	A	6
2	A	6
3	A	6
4	B	6
5	B	6
6	B	6

3. Luego se realiza el procedimiento descrito en la Sección 4.6 para medir el conteo de radón en el equipo de centelleo líquido y finalmente se registran los datos en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Tabla resumen de las cuentas por segundo y desviación estándar de cada dispositivo analizado.

N° de dispositivo	CPS	CPS (promedio)	Desviación estándar (%)
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Criterios de aceptación de la robustez

- a. Desviación estándar $\leq 5\%$

Se propone utilizar los parámetros de linealidad y robustez para evaluar la metodología debido a las siguientes razones:

- a. Son los parámetros mínimos o básicos para llevar a cabo la validación de la metodología.
- b. Son los parámetros que se tomaron y se lograron simular en la propuesta de software.
- c. Debido a la pandemia por el COVID-19 solo se pudo realizar una pequeña prueba piloto que generó datos insuficientes para poder plantear los demás parámetros estadísticos, que de la misma manera que los considerados en

el protocolo son de igual importancia en la validación de métodos físicoquímicos.

12. Pruebas de control

Las pruebas de control se llevarán a cabo según la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Pruebas de control de la metodología para estimación de concentraciones de gas radón en carbón activado.

Prueba	Procedimiento	Frecuencia	Observaciones
Medición de blanco (Carbón activado)	Esta prueba consiste en medir 5 blancos de carbón activado en el equipo de centelleo líquido.	Una vez por corrida de calibración	Con los datos obtenidos de esta prueba se deben elaborar cartas de control que permitan analizar los rangos de medición y establecer el comportamiento de los datos.
Medición del patrón utilizado para calcular la eficiencia del equipo de detección.	Se deben medir 5 soluciones patrón con actividad de 1 Bq/L del patrón NIST-01 en el equipo de centelleo líquido.	Una vez por corrida de calibración.	

CONCLUSIONES

- I. Los desarrollos metodológicos propuestos contribuyen para el desarrollo e implementación de un plan experimental que permitirá calibrar y evaluar la metodología para la determinación de gas radón en aire aplicando el centelleo líquido como técnica de medición.
- II. Para la etapa de calibración se comprobó la viabilidad técnica de la metodología propuesta de medición del gas radón con centelleo líquido, a través de la simulación matemática de condiciones experimentales utilizando el programa KEMRADÓN-CIAN y el uso de un conjunto de datos experimentales generados en una prueba piloto realizada por los asesores del CIAN-FIA-UES.
- III. Las propuestas metodológicas son viables desde el punto de vista funcional dado que la selección de equipos para el diseño y construcción de la cámara de calibración de la metodología se realizaron considerando como criterio principal de selección las características operativas de los equipos, disponibilidad de materiales en el laboratorio del CIAN-FIA-UES y los rangos de operación (descritos en la sección 4.3.3.), lo que representa una ventaja para su implementación en el corto plazo, pues están accesibles a nivel local.
- IV. Uno de los principales aportes de la presente investigación es el haber generado un método y un programa de cálculo para medir el comportamiento y la capacidad de adsorción para diferentes tipos de carbón activado que estén disponibles a nivel local, ya sea de origen comercial o que incluso pueda ser producido localmente o por los mismos laboratorios del CIAN y con ello puedan seleccionar el carbón activado que mejor se adapte a los requerimientos óptimos con los que se debe cumplir para ser considerado un medio adsorbente eficaz y eficiente, esto representa otra característica más que apoya la viabilidad técnica de la metodología y su factibilidad para la implementación.

- V. Otro aspecto importante que contribuirá al fortalecimiento de competencias relacionadas con las investigaciones de gas radón en aire, es la inclusión en la propuesta metodológica de 2 métodos de muestreo en campo, siendo el primero aplicable para el muestreo en viviendas o centros de trabajo de la población (espacios cerrados con poca ventilación) y el otro aplicable para sitios de interés ambiental (cuevas turísticas, balnearios y campos geotérmicos) con el objetivo de contar con muestras que sean más representativas y con ello contribuir a la obtención de datos de confiabilidad para poder determinar con mayor confianza si las concentraciones de radón encontradas están fuera o dentro de los límites permisibles en cumplimiento a lo establecido por el Reglamento Especial de Protección y Seguridad Radiológica de El Salvador.

Los elementos característicos para la toma de muestra para los espacios cerrados son el número de dispositivos de muestreo de radón en función del tipo de vivienda o características de las zonas de trabajo de las personas tomando en cuenta factores de espacio, posición y tiempo. Igualmente, en el caso del procedimiento de muestreo para estudios ambientales, el número de dispositivos de muestreo a ubicar está en función de cubrir la mayor área posible para lograr mayor representatividad, se recomienda colocar 1 dispositivo de muestreo por cada 50 m². Y dado que la humedad es un factor importante en los muestreos para estudios ambientales es recomendable realizarlos en la época seca (de noviembre a abril). Ambos procedimientos de muestreo se pueden catalogar como procedimientos sencillos y prácticos, que si son viables de implementar para llevarse a cabo por los laboratorios del CIAN.

- VI. Se elaboró un Protocolo de Evaluación del Método propuesto en base a la Guía de Validación de Métodos Analíticos Físicoquímicos del Organismo Salvadoreño de Acreditación (OSA), con el objeto de establecer si la metodología propuesta es pertinente para la cuantificación de radón en aire por centelleo líquido.

- VII. La contribución en esta investigación a través del uso del software diseñado en Microsoft Excel KEMRADON-CIAN, el cual se soporta en los elementos clave de la propuesta metodológica como lo son: la caracterización físicoquímica del carbón activado, los cálculos de densidad aparente y concentración inicial de radio en tierra, la calibración de la metodología con sus cálculos y gráficos asociados, lo relacionado con el muestreo en viviendas, edificios, espacios ambientales y sus correspondientes cálculos, permitirá maximizar el registro, manejo y sistematización de la información recabada en cada etapa de calibración, evaluación y cuantificación de la concentración de gas radón.

RECOMENDACIONES

- I. Para el método de calibración, en lo que respecta a la etapa de preparación de la fuente emanadora de gas radón mediante el uso de gasa impregnada con solución de radio, se recomienda hacer pruebas a diferentes niveles de concentración de radio, con el fin de determinar la que genera una mejor transferencia de radón hacia el aire que sea detectable por el equipo de centelleo líquido en el período de tiempo establecido para la calibración.
- II. Si se tiene interés en la implementación de la metodología propuesta de medición de gas radón con espectrometría gamma para realizar estudios ambientales, basándose en los resultados obtenidos de la prueba piloto y teniendo en cuenta la sensibilidad del equipo; se recomienda desarrollar las pruebas de optimización para esta técnica, ensayando una serie de variaciones, como por ejemplo la sustitución del vial de vidrio por el cánister, variación de altura de torre de carbón activado si se desea implementar el conteo a través de espectrometría gamma.
- III. Se debe realizar lectura previa del Manual de Usuario del software KEM RADON-CIAN, para manejar y completar sistemáticamente la información requerida y aprovechar todo el potencial que posee en cuanto al análisis y funcionamiento completo de todas las etapas metodológicas asociadas al proceso de medición del gas radón. Se sugiere dar capacitaciones a los potenciales usuarios del programa KEMRADON-CIAN en los laboratorios del CIAN, quienes además de sus técnicos de laboratorio, pueden ser grupos de estudiantes que podrían apoyar la realización de proyectos en horas sociales o de tesis, para lo que también puede ser útil generar una base de datos de temas de investigación en los que se apliquen las técnicas de medición del gas radón en aire con centelleo líquido y así

aprovechar las herramientas que se generaron como producto de la presente investigación.

- IV. Durante el proceso de implementación práctica de las metodologías propuestas para la medición de gas radón en aire, se pueden identificar puntos de mejora, por lo que siempre estarán sujetas a sufrir modificaciones con el fin de fortalecer y eficientizar su aplicabilidad para la determinación de gas radón en aire con la técnica de centelleo líquido, por lo que se recomienda monitorear su desempeño a través del tiempo en que éstas se utilicen desde el inicio de su implementación y puesta en marcha.

- V. Dada la importancia e implicaciones a la salud y al medio ambiente de la potencial presencia de este contaminante silencioso el radón gaseoso es de fundamental importancia realizar campañas educativas, formativas y de conciencia de lo significativo que puede ser el monitorear en las viviendas y lugares de trabajo de la población las concentraciones de este contaminante, esto es un primer paso como parte de la toma de acciones preventivas relacionadas con la salud de la población, corresponde al CIAN y autoridades de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la UES ser protagonistas en la tarea de difundir y aprovechar el hecho de que el CIAN cuenta con la capacidad técnica y analítica para realizar este tipo de monitoreo y ponerlo al servicio de la población salvadoreña y también corresponde al sector estudiantil de la Universidad de El Salvador potencializar la oportunidad de fortalecer sus conocimientos en esta área de la ciencia y descubrir la aplicabilidad de las técnicas de centelleo líquido y espectrometría gamma en la comprensión, estudio y resolución de los problemas ambientales que atañen a nuestra sociedad.

- VI. Debido a la falta de acceso a la información de los diferentes proveedores de equipos y materiales necesarios para la construcción de la cámara de calibración y los procesos de importación de los mismos, se recomienda considerar otras opciones para la construcción de la cámara de calibración del método propuesto, dado que existe localmente la capacidad técnica.

GLOSARIO

Activación física: Este método de activación tiene lugar en dos etapas: carbonización y activación del carbonizado mediante la acción de gases oxidantes como vapor de agua, dióxido de carbono, aire o mezcla de los mismos, siendo el oxígeno activo el agente activante el responsable de quemar las partes más reactivas del esqueleto carbonoso y el alquitrán retenido dentro de la estructura porosa.

Activación química: La activación química se caracteriza porque la carbonización y la activación tienen lugar en una sola etapa, llevada a cabo por la descomposición térmica de la materia prima impregnada con agentes químicos, tales como ácido fosfórico, cloruro de zinc, hidróxido de potasio o tiocianato de potasio.

Adsorbato: Película formada por molécula, átomos o iones adsorbidos por una sustancia en su superficie.

Adsorbente: Sólido que tiene la capacidad de retener sobre su superficie un componente presente en corrientes líquidas o gaseosas. Se caracterizan por una alta superficie específica y por su inercia química frente al medio en el que se van a utilizar.

Adsorción: Es el proceso por el cual átomos o moléculas de una sustancia que se encuentra en determinada fase, son retenidas en la superficie de otra sustancia, que se encuentra en otra fase. Como resultado de este proceso, se forma una capa de líquido o gas en la superficie de una sustancia sólida o líquida.

Adsorativo: Material en la fase gas que es potencialmente capaz de ser adsorbido.

Becquerelio: Es la unidad que mide la frecuencia de desintegración o transformación de un núcleo radiactivo o lo que es lo mismo es el número de desintegraciones por segundo de átomos de radón en un metro cúbico de aire.

Carbón activado: Es un material de carbón que se prepara para que tenga una elevada superficie interna y así poder adsorber (retener sobre su superficie) una gran cantidad de compuestos en fase gas o en disolución.

Configuración electrónica: La configuración electrónica del átomo de un elemento corresponde a la ubicación de los electrones en las órbitas de los diferentes niveles de energía.

Desintegración: Propiedad de los elementos radiactivos según la cual la masa del elemento se va transformando en energía radiante y en otros elementos de menor masa.

Emanación de radón: Es el proceso por el cual los átomos de radón logran escapar de un grano de material como resultado de su retroceso cuando el radio se desintegra.

Exhalación de radón: Es el proceso mediante el cual el gas radón es liberado hacia la atmósfera tras ser transportado desde su origen.

Fuerzas de dispersión de London: Son fuerzas intermoleculares débiles que surgen de fuerzas interactivas entre multipolos temporales en moléculas sin momento multipolar permanente.

Fuerzas de Van der Waals: Se conoce como fuerzas de Van der Waals o interacciones de Van der Waals a un cierto tipo de fuerzas intermoleculares atractivas y repulsivas, diferentes de aquellas que generan los enlaces atómicos o la atracción electrostática entre iones y otras moléculas.

Hullas: Es una roca sedimentaria orgánica, un tipo de carbón mineral que se considera entre un 80% y un 90 % de carbono, es dura y quebradiza, estratificada, de color negro y brillo mate o también graso.

Isótopos: Se denomina isótopos a los átomos de un mismo elemento, cuyos núcleos tienen una cantidad diferente de neutrones, y por lo tanto, difieren en número másico.

Lignito: Es un tipo de carbón mineral que se forma por compresión de la turba, se forma a partir de restos fosilizados y de acuerdo a como se desarrolle el proceso de conformación y dependiendo de su concentración de carbono, será el producto final.

Partícula alfa: Partícula compuesta de dos protones y dos neutrones, es emitida por los radionúclidos.

Permeabilidad del suelo: Es la propiedad que tiene el suelo de permitir el paso de los fluidos (aire y agua) a través de sus poros.

Producto de desintegración: Núcleo o radionúclido que se forma como resultado de una desintegración nuclear o de una serie sucesiva de ellas a través de varios radionúclidos.

Radiación natural: Radiación ionizante emitida por elementos de origen natural como el uranio, o por fuentes naturales como el sol.

Radiactividad: Propiedad de los radionúclidos de emitir de forma espontánea radiaciones ionizantes.

Radón-222: Gas inerte y radiactivo que es producto de la desintegración del uranio-238.

Sustancias polares: Son aquellas moléculas que sin estar compuestas de iones, presentan exceso de carga positiva en uno de los lados y de carga negativa en otro.

Transporte de radón: Es el mecanismo en donde los átomos de radón en el espacio intersticial pueden ser transportados a la superficie del suelo por difusión o por advección a través del terreno, hasta que se desintegran o son finalmente liberados al aire.

Turbas: Es un material orgánico, de color pardo oscuro y rico en carbono.

Uranio: Uno de los elementos radiactivos de origen natural, metálico y muy difundido en la naturaleza.

BIBLIOGRAFÍA

1. AcrylicART. [Figura]. (s.f). acrylicART Plastic Fabrication & MACHINING. EE.UU. Recuperado de <https://www.acrylicart.com>.
2. AEFI (2001). Asociación Española de Farmacéuticos de la Industria. Validación de métodos analíticos. Madrid, España. Recuperado de <https://www.academia.edu>.
3. Akber, R.A & Alharbi, S.H. (2014). Radon-222 activity flux measurement using activated charcoal canisters: Revisiting the methodology. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 124. pp. 94-99. Canadá. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com>.
4. Akralab [Figura]. (s.f). España. Recuperado de <https://www.akralab.es>.
5. Alquera [Figura] (s.f). *CARBÓN ACTIVO. USOS Y APLICACIONES*. España. Recuperado de <https://www.alquera.com>.
6. Álvarez Gutiérrez, N. (2016). *PROCESOS DE ADSORCIÓN PARA LA CAPTURA DE CO₂ EN CORRIENTES DE BIOGÁS*. (Tesis Doctoral para optar al grado de Doctor en Ingeniería Energética). Universidad de Oviedo, Oviedo, España. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es>.
7. Amazon. (s.f). Características de equipo iPower Almohadilla Calentadora para Terrarios. EE.UU. Recuperado de <https://www.amazon.com>.
8. Ariza Calderón, H., Echeverry Montoya, N.A., Fonthal, G., Prías Barragán, J.J. y Rojas González, C.A. (2011). IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES ÓPTIMAS PARA LA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DEL PRECURSOR *GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH*. *Revista Académica de Colombia*. vol. 35(135), pp. 157-166. Recuperado de <https://docplayer.es>.
9. ARN. (1999). *Autoridad Regulatoria Nuclear Informe Anual*. Argentina. Recuperado de <https://www.argentina.gob>.
10. ASTM, I. (1999). *ASTM D2867-99, Standard Test Method for Moisture in Activated Carbon*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA: Annual Book of ASTM Standards.
11. ASTM, I. (1999). *ASTM D3838-80, Standard Test Method for pH of Activated carbon*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA: Annual Book of ASTM Standards.

12. ASTM, I. (1999). *ASTM D2866-97, Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA: Annual Book of ASTM Standards.
13. ASTM, I. (1999). *ASTM D2862-97, Standard Test Method for Particle Size Distribution of Granular Activated Carbon*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA: Annual Book of ASTM Standards.
14. ASTM, I. (2000). *ASTM D2854-96, Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA: Annual Book of ASTM Standards.
15. ASTM, I (2003). *ASTM C 29/C 29M-97, Standard Test Method for Bulk Density and Voids in Aggregate*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA: Annual Book of ASTM Standards.
16. ASTM. I. (2014). *ASTM D5832-98, Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbon Samples*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA: Annual Book of ASTM Standards.
17. Ayala A. (2009). *Medición de Rn-222 en Ambientes Geohidrológicos en la Fracción central de México*. (Tesis de grado para optar al título de: Licenciado en Química), Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, México D.F, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx>.
18. Balcázar, M., Flores Ruiz, J.H., López Martínez, A., y Peña García, P. (s.f). RADÓN, TRAZADOR NATURAL de interés geofísico y ambiental. *El ININ hoy*, pp 32-36. México. Recuperado de <https://www.yumpu.com>.
19. Bálint, G.P., Bálint, P.V., Bender, T., Gutenbrunner, G., Karagüelle & Suenik, S. (2004). Hydrotherapy balneotherapy, and spa treatment in pain management. USA. Recuperado de <https://www.researchgate.net>.
20. Barahona, F., Benítez, B., Henríquez, B., Hernández, A., Hernández, P., López, D., Olmos, R. y Pérez, N. (2004). *ANOMALIAS DE RADON Y TORON EN EL CERRO PACHO Y EN EL CRATER DEL VOLCAN DE SANTA ANA, EL SALVADOR. CENTRO AMERICA*. El Salvador, Centro América: Instituto de Ciencias de la Tierra. Universidad de El Salvador. Canary Islands, Spain: Environmental Research Division. Ohio, USA: Department of Geological Sciences.

21. Barrera, M., Romero, M.L. y Valiño, L. (2008). *Puesta a Punto de un Sistema de Espectrometría Gamma para la Determinación de Cs-137 en Suelos Españoles*. (Informes Técnicos Ciemat). Madrid, España: Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Recuperado de <https://inis.iaea.org>.
22. Bastidas, M., Buelvas, L.M., Márquez, M.I. y Rodríguez, K. (2010). Producción de Carbón Activo a partir de Precursores Carbonosos del Departamento del Cesar, Colombia. *Información Tecnológica*. vol 21(3). pp. 87-96. Recuperado de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v21n3/art10.pdf>.
23. Bommer, Julian J., Carr, Michael J., Major, John J., López, Dina L & Rose, William I. (2004). Dynamics of diffuse degassing at Ilopango Caldera, El Salvador. En Hernández, P. A., Monterrosa, J., López, D.L., Pérez, N. M. & Ramson, L. (eds.). *Natural Hazards in El Salvador*. (pp. 191-193). Colorado, United States of America: Editorial The Geological Society of America. Recuperado de <https://www.researchgate.net>.
24. Bustamante Londono, J., Orozco González, N., Sepúlveda Escribano, A., Silvestre Albero, J. y Suárez Gil, S. (2008). *Adsorbentes para eliminación de COVs en Eliminación de emisiones atmosféricas de COVs por catálisis y adsorción*. CYTED, pp. 50-59. España.
25. Canoba, A.C. y López, F.O. (1998). *DETERMINACIÓN DE RADÓN POR ADSORCIÓN EN CARBÓN ACTIVADO Y MEDICIÓN POR CENTELLEO LÍQUIDO*. Argentina. Recuperado de <https://docplayer.es>.
26. Canoba, A.C. y López, F.O. (2001). Estudio teórico de la adsorción de gas ^{222}Rn en carbón activado. Argentina. Recuperado de <https://www.foroiberam.org>.
27. Canoba, A. C y López, F.O. (2006). Mediciones de ^{222}Rn en el interior de Viviendas de la República de Argentina. *Primer Congreso Americano del IRPA 2006*. Congreso llevado a cabo en la XXIV Reunión Anual de la SMSR y XVII Congreso Anual de la SNM/XXIV, Acapulco, México. Recuperado de <https://inis.iaea.org>.
28. CARBONES MEXICANOS (s.f). *CARBON ACTIVADO DE HUESO DE COCO*. México. Recuperado de <https://carbonactivado.es>.
29. Carrasco Tito, B.S. y Londa Veletanga, E.G. (2018). Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco "*Cocos Nucífera L*". (Trabajo de grado para optar al título de: Ingeniero Químico, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador). Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec>.

30. CIEMAT (2013). Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Curso de Supervisores de instalaciones radiactivas (IR) Módulo básico. España. Recuperado de <http://csn.ciemat.es>.
31. Ciencia a conciencia (Noviembre de 2014). *¿Qué es, cómo actúa y cómo se prepara el carbón activo?* [Archivo de video]. España. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=uniApW9hpvs>
32. Cirrincione, R., Currenti, G., Ferrera, E., Giammanco, S., Neri, M., Patane, G. & Zanon, V. Soil radon measurements as a potential tracer of tectonic and volcanic activity. USA. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov>.
33. Colmenero Sujo, L., De la Garza, R., Espino Valdés, M.S., Pinales Munguía, A., Rubio Arias, H., Silva Hidalgo, H., Villalba, M.L y Viramontes Olivas, O. (2015). Cuantificación de radón (^{222}Rn) en aire y dosis de radiación en baños termales del norte de México. *Nova Scientia*. Vol. 7 (3), pp. 153-167. México. Recuperado de <https://www.researchgate.net>.
34. Comisión de las Comunidades Europeas. (1990). 90/143/Euratom. Recomendación de la Comisión, de 21 de febrero de 1990, relativa a la protección de la población contra los peligros de una exposición al radón en el interior de edificios. Publicada en el Diario Oficial No. L 080, del 27 de abril de 1990. Bélgica. Recuperado de <https://eur-lex.europa.eu>.
35. CSN (2012). CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR. Metodología para la evaluación de la exposición al radón en los lugares de trabajo. (GSG-11.04). Madrid, España. Recuperado de <https://www.csn.es>.
36. Cothorn, C.R. & Smith Jr. J.E. (1987). *Environmental Radon*. USA. Recuperado de <https://books.google.com/sv/books>.
37. D.E. Watkins & Wilkening, M.H. (1976), *Air exchange and ^{222}Rn concentrations in the Carlsbad Caverns*. USA. doi:10.1097/00004032-197608000-00007.
38. De la Torre, E, Iordanov, P, y Muñoz, G.A. (2004). Caracterización de un compuesto carbón activado-poliácido acrílico para el *tratamiento más limpio de minerales portadores de oro*. Chile: Proceedings of the Clean Technologies for the Mining Industry. Recuperado de <http://www2.udec.cl>.
39. DPR (2018). Dirección de Protección Radiológica del Ministerio de salud. Acuerdo Ejecutivo. Reglamento Especial de Protección y Seguridad Radiológica de El Salvador. Publicado en el Diario Oficial No. 190, del 11 de octubre de 2018. El Salvador. Recuperado de <https://www.jurisprudencia.gob.sv>.

40. Ensor D.S., Wasan, D.T., Menon, V.B., Michaels, L.D. y Nagarajan, R. (1990). A Mathematical Model for Rn Sampling by Activated C Adsorption. *Health Physics*. vol. 58(5). pp.575-581. USA. Recuperado de <https://journals.lww.com>.
41. EPA (1987). United States Environmental Protection Agency *The Risk Assessment Guidelines of 1986*. Washington DC, USA. Recuperado de <https://nepis.epa.gov>.
42. EPA (1987). United States Environmental Protection Agency. *EERF Standard Operating Procedures for Rn-222 Measurement Using Charcoal Canisters*. (EPA 520/5-87-005). Montgomery, USA. Recuperado de <https://nepis.epa.gov>.
43. EPA (1989). United States Environmental Protection Agency. *Indoor Radon and Radon Decay Product Measurement Protocols* (EPA 520/1-89-009). Montgomery, USA. Recuperado de <https://nepis.epa.gov>.
44. EPA (1990). United States Environmental Protection Agency. *NAREL Standard Operating Procedures for Radon-222 Measurement Using Diffusion Barrier Charcoal Canisters*. (EPA 520/5-90-032). Montgomery, USA. Recuperado de <https://nepis.epa.gov>.
45. EPA (2017). Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. *Manual Informativo Sobre El Radón. La guía para proteger a su familia y a usted del radón*. EE.UU. Recuperado de <https://espanol.epa.gov>.
46. Eurachem (2005). MÉTODOS ANALÍTICOS ADECUADOS A SU PROPÓSITO. (CNM-MRD-PT-030). México. Recuperado de <https://www.grupocclab.com.mx>
47. Field, R.W & Kross, B. C (1996). Intercomparison of Waterborne ²²²Rn Collection Methods: Professional Vs. Homeowner Collection. *Groundwater Monitoring & Remediation*. vol 16(4), pp 106-112. USA. Recuperado de <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com>.
48. Fisher Scientific. (2016). *Focus on Glassware & Plasticware*. USA. Recuperado de <https://static.fishersci.eu>.
49. Fisher Scientific. [Figura]. (s.f). Fisher scientific part of Thermo Fisher Scientific. USA. Recuperado de <https://www.fishersci.es>.

50. Flores Vanegas, W.A. y Reyes Lúe, A.M. (2004). *MEDICIÓN DE ^{99}Tc EN AGUAS RESIDUALES Y BIOTA MARINA (ALGAS Y LANGOSTAS), APLICANDO LA TÉCNICA DE CENTELLEO LÍQUIDO*. (Trabajo de grado para optar al título de: Licenciado en Física, Universidad de El Salvador). Recuperado de <https://repositorio.ues.edu.sv>.
51. Franco García, A. (s.f). *Mecánica cuántica*. México. Recuperado de <http://www.sc.ehu.es>.
52. Freepik. [Figura]. (s.f). España. Recuperado de <https://www.freepik.es>.
53. Fuente Lastra, M. (2016). *Estudio de diferentes técnicas para la medida de exhalación de radón en suelos*. (Trabajo de Fin de Máster para acceder al Máster en Física, Instrumentación y Medio Ambiente), Universidad de Cantabria UC, Comunidad autónoma de Cantabria, España. Recuperado de <https://repositorio.unican.es>.
54. Fuente Merino, I., González, A., Gutiérrez Villanueva, J., Quindos Poncela, L., y Sainz Fernández, C. (2013). *El uso de radón como trazador en ciencias mediambientales*. Cantabria, España: Universidad de Cantabria. Recuperado de <https://www.researchgate.net>.
55. Galicia Ambiental (2019). España. *Nuevo estudios sobre el gas radón*. Recuperado de <https://galiciaambiental.org>.
56. García Martínez, J. y Pérez Pariente, J. (2003). *Materiales zeolíticos: síntesis, propiedades y aplicaciones*. Alicante, España: Universidad de Alicante. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es>.
57. Gesa (s.f). España. (Características de quipo InkBird ITC-308). Recuperado de <https://www.termometros.com>.
58. GFA Consulting Group. (2006). *Investigaciones hidrogeológicas, hidrológicas e hidroquímica en el lago de Coatepeque: Reporte FORGAES y SNET*. El Salvador. Recuperado de <https://es.scribd.com>.
59. Hang, Y., Mei, W., Li, C., Liu, D., Xiao, L. & Wang, N. (2008). Level of Radon Exhalation Rate from Soil Some Sedimentary and Granite Areas in China. *Journal of Nuclear Science and Technology*. Vol. 46(3). pp. 303-309. China. Recuperado de <https://www.researchgate.net>.

60. Hernández, H.E.A. (2015). *El radón en suelos, rocas, materiales de construcción y aguas subterráneas de las Islas Canarias Orientales*. (Tesis Doctoral para optar al título de: Doctor en Ciencias Físicas, Universidad de las Palmas de Gran Canaria, España). Recuperado de <https://www.researchgate.net>.
61. Horrocks, D.L. (1974). *Applications of Liquid Scintillation Counting*. USA. Recuperado de <https://books.google.com.sv/books>.
62. IAEA (1993). International Atomic Energy Agency. *Isotopic and geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruptions*. IAEA-TECDOC-726. Viena, Austria. Recuperado de <http://www-naweb.iaea.org>.
63. IAEA (2012). International Atomic Energy Agency. *Sources and Measurements of Radon and Radon Progeny Applied to Climate and Air Quality Studies*. USA. Recuperado de <https://www.pub.iaea.org>.
64. ICRP (1990). International Commission on Radiological Protection. vol. 21(60). pp. 1-3. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Canada. Recuperado de <https://riunet.upv.es>.
65. INKBIRD (s.f). Características de equipo Inkbird IHC-200. INKBIRD SAMRT HOME & SAMRT LIFE. USA. Recuperado de <https://www.ink-bird.com>.
66. INKBIRD (s.f). Características de equipo InkBird ITC-308. INKBIRD SAMRT HOME & SAMRT LIFE. USA. Recuperado de <https://www.ink-bird.com>.
67. ISP (2010). Instituto de Salud Pública de Chile. Validación de métodos y determinación de la incertidumbre de la medición: "Aspectos generales sobre la validación de métodos". Santiago, Chile. Recuperado de <https://www.academia.edu>.
68. INSHT (2008). Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. *Radiaciones ionizantes: normas de protección*. (NTP 614). España. Recuperado de <https://www.insst.es>.
69. ISG (s.f). Instituto para la Salud Geoambiental, Un ser vivo, un entorno sano. España. Recuperado de <https://www.saludgeoambiental.org/gas-radon>.
70. ISTAS (2017). Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud. Exposición laboral al radón. Guía para la prevención. (EI 2017/0002). España. Recuperado de <https://istas.net>.

71. Johnston, A. & Spehr, W. (1983). The measurement of radon emanation using activated charcoal. *INSTRUMENTATION RELATED TO NUCLEAR SCIENCE TECHNOLOGY*. vol 1(3), pp 113-116. Australia. Recuperado de <https://inis.iaea.org>.
72. Jurado, J.M (2008). *Aplicación de Microsoft Excel a la Química Analítica: validación de métodos analíticos*. México. Recuperado de <https://personal.us.es>.
73. Kappel, R., Keller, G., Kreienbrock, L., & Nickels, R. (1992). An epidemiological study using passive radon measurement by liquid scintillation counting. En J. Noakes, F. Schonhofer, & H. Polach, *Liquid Scintillation Spectrometry* (pp. 319-323). Viena, Austria: The Austrian Society for Liquid Scintillation Spectrometry.
74. Kruger P & Warren G. (1978). *RADON IN GEOTHERMAL RESERVOIR ENGINEERING*: Stanford, USA: Stanford University. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com>.
75. MARN-Guatemala. (2018). Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Guía para elaborar Estudios de Caracterización de Residuos Sólidos Comunes: Ciudad de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <https://www.marn.gob>.
76. Marrot, J. (2019). Radón en los edificios. Un riesgo para la salud que se debe prevenir. España. Recuperado de <http://informatiu.apabcn.com>.
77. Marteinson, V.T. & Thorolfsdottir, B.O.T. (2013). Microbiological Analysis in Three Diverse Natural Geothermal Bathing Pools in Iceland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. USA. Recuperado de <https://www.researchgate.net>.
78. Martín Megías, A.I. y Navarro Gómez, M. (2010). Aguas radiactivas. ¿fe peligrosa o beneficio demostrado. *Anales de Hidrología Médica*. vol. 3, pp. 109-129. Madrid. España. Recuperado de <https://revistas.ucm.es>.
79. Martínez Leiva, P. (1983). Aplicación de trazadores químicos en el aforo de la descarga de los manantiales de San Diego de Alcalá, Chih. Boletín de Investigación Geohidrológica. Vol.2. pp. 1-5. México.
80. MASTER SUPPLY. [Figura]. (s.f). Argentina. Recuperado de <https://www.mastersupply.com>.

81. Medical EXPO (s.f). Características de equipo de cámara hecha de Acrílico (polimetilacrilato PMMA). Medical EXPO VIRTUALEXP GROUP. USA. Recuperado de <https://www.medicalexpo.es>.
82. Morales Navarro, K. M., Rodríguez Contreras, A.D., Sigüenza Díaz, A.I. (2019). *EVALUACIÓN DE PARÁMETROS RADIOLÓGICOS RADÓN (Rn^{222}) y RADIO (Ra^{226}) EN MATRICES DE AGUA SUBTERRÁNEA DESTINADAS AL CONSUMO HUMANO, EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR* (Trabajo de grado para optar al título de: Ingeniera Química, Universidad de El Salvador). Recuperado de <https://repositorio.ues.edu.sv>.
83. Morales Navarro, K.M., Sigüenza Díaz, A.I., (2018). DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD DEL RADÓN (Rn^{222}) EN FUENTES TERMALES DE ÁREAS GEOTÉRMICAS. (Proyecto de Investigación de Diplomado en Geotermia para América Latina Edición 2018, Escuela de Posgrado de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador). Recuperado de <http://ri.ues.edu.sv>.
84. Muhye, A. (s.f). México. Porosidad química: características, tipos y ejemplos. Lifeder. Recuperado de <https://www.lifeder.com>.
85. Nagda, N.L. (1994). *Radon-Prevalence, Measurements, Health Risks, and Control*. USA: American Society for Testing & Materials. Recuperado de <https://www.astm.org>.
86. Noverques Medina, A. (2017). *DESARROLLO DE METODOLOGÍAS PARA LA REALIZACIÓN DE MEDICIONES DE EXHALACIÓN DE RADÓN-222*. (Trabajo de Fin de Master en Ingeniería Química, Universitat Politècnica de València, Valencia, España). Recuperado de <https://riunet.upv.es>.
87. Núñez Gómez, M. (2019). *Homogeneidad de la concentración de gas radón en el interior de una cámara de referencia*. (Trabajo de grado para optar al título de: Licenciado en Física, Universidad de Cantabria, Cantabria, España). Recuperado de <https://repositorio.unican.es>.
88. LENNTECH. (2019). Adsorción/Carbón activo. Países Bajos. Recuperado de <https://www.lenntech.es>.
89. OMS (2015). Organización Mundial de la Salud. *Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de salud pública*. Ginebra, Suiza. Recuperado de <https://apps.who.int>.
90. ONUAA. (2018). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Comisión del Codex Alimentarius. Manual de procedimiento. Roma, Italia. Recuperado de <http://www.fao.org>.

91. OSA (2017). Organismo Salvadoreño de Acreditación. *VALIDACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICOS FÍSICOQUÍMICOS*. (G 9.6). San Salvador, El Salvador. Recuperado de <http://www.osa.gob.sv>.
92. Payes Hernández, J.E. (2017). Radiactividad Natural en Aguas de Consumo Humano y Ambiental. Estudio Preliminar. *Revista El Salvador Ciencia y Tecnología*, 22(32), pp. 25. El Salvador. Recuperado de <https://issuu.com>.
93. Payes, J., Olmos, R. y Rodríguez, R. MEDICIÓN DE GAS RADÓN (Rn^{222}) EN AGUAS TERMALES DEL CERRO PACHO, CALDERA COATEPEQUE, EL SALVADOR: *Revista Geológica de América Central*, 1(50), pp. 71-82. El Salvador. Recuperado de <https://www.redalyc.org>.
94. Pazmiño Ayala, J.H. (2007). *Estudio de la adsorción de oro en carbón activado a diferentes condiciones, y modelado de la cinética de adsorción en función del tamaño de partícula*. (Tesis de pregrado para optar al título de: Ingeniero Químico, Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador). Recuperado de <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/747>.
95. Pérez Mendoza, N. S. y Ventura Hernández, N.I. (2019). PROPUESTA DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE REMOCIÓN DE PLOMO EN AGUAS, A NIVEL DE LABORATORIO, UTILIZANDO ESTOPA DE COCO (*Cocos nucifera*) COMO MEDIO AMBIENTE. (Trabajo de grado para optar al título de: Ingeniera Química), Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador. Recuperado de <https://repositorio.ues.edu.sv>.
96. Phillip, H.J (2002). A Critique of the EPA Method for Analyzing and Calibrating Charcoal Canister for Radon Measurements. Simposio llevado a cabo en el 2002 International Radon Symposium Proceedings. Dayton. USA. Recuperado de <https://aarst-nrpp.com>.
97. PLANOSPORA. [Figura]. (s.f). México. Recuperado de <https://www.planospara.com>.
98. PriceSmart (s.f). Características de equipo Nebulizador Rossmax. El Salvador. Recuperado de <https://www.pricmart.com>.
99. QUARTA (s.f). Características de equipo RADEX MR107. Rusia. Recuperado de <https://www.quarta-rad.ru>.
100. Quindós Poncela, L.S. (1995). *Radón "Un gas radiactivo de origen natural en su casa"*. España. Recuperado de <https://books.google.com.sv>.

101. Rodríguez Carpio, J.R. (2013). *CUANTIFICACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE RADÓN (^{222}Rn) Y RADIO (^{226}Ra) APLICANDO LA TÉCNICA DE CENTELLEO LÍQUIDO EN AGUAS TERMALES DEL CERRO PACHO, LAGO DE COATEPEQUE, DEPARTAMENTO DE SANTA ANA.* (Trabajo de grado para optar al título de: Licenciado en Ciencias Químicas, Universidad de El Salvador). Recuperado de <https://repositorio.ues.edu.sv>.
102. Santiago H, P.M. (2004). *DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DINÁMICOS DEL GAS RADÓN EN AGUAS TERMALES Y POTABLES DEL DISTRITO MIRANDA, EDO, FALCÓN.* (Trabajo de grado para optar al título de: Magister Scientiarum en Ciencias Aplicadas, Universidad de Zulia, Venezuela). Recuperado de <https://www.academia.edu>.
103. Servielectric Industrial. (Características de equipo Higrostató Mecánico IP20). (s.f). El Salvador. Recuperado de <http://servielectric.com.sv>.
104. Servielectric Industrial (s.f). Características de equipo Termómetro de aceite. El Salvador. Recuperado de <http://servielectric.com.sv>.
105. SNET (2020). Servicio Nacional de Estudios Territoriales. *Origen del Vulcanismo en El Salvador.* El Salvador. Recuperado de <http://www.snet.gob.sv>.
106. Underhill, D.W. (1977) Nuclear Science and Engineering vol. 63(133). USA. Recuperado de <https://www.ans.org>.
107. UNSCEAR (2000). United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. vol. 1. United Nations Publication. New York. USA. Recuperado de www.unscear.org.
108. UNSCEAR (2008). United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION.* USA. Recuperado de www.unscear.org.
109. Universidad de Sevilla (2011). *Manual del Carbón activo.* España. Recuperado de <http://www.elaguapotable.com>.
110. Universidad de Valladolid. (2001). *REGLAMENTO DE FUNCIONAMIENTO Y PLAN DE EMERGENCIA DE LA INSTALACIÓN RADIATIVA DEL INSTITUTO DE BIOLOGÍA Y GENÉTICA MOLECULAR (IBGM).* Valladolid, España. Recuperado de <http://www.ibgm.med.uva.es>.
111. Valencia Oleas, C.A. (1999). *Estudio del proceso carbón en pulpa para minerales auríferos.* (Tesis de grado para optar al título de: Ingeniero Químico, Escuela Politécnica Nacional EPN, Quito, Ecuador). Recuperado de <https://biblioteca.epn.edu.ec>.

112. WHO (1987). World Health Organization. *Air quality guidelines for Europe*. Regional Office for Europe. Copenhagen, Denmark. Recuperado de <https://www.euro.who.int>.
113. WHO (2006). World Health Organization. *Guidelines for safe recreational water environments*. Suiza. Recuperado de https://www.who.int/water_sanitation_health/bathing/srwe2full.pdf

ANEXOS

ANEXO 1 OBTENCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE LA ESTOPA DE COCO.

A. Etapa de recolección, secado y reducción de tamaño de la materia prima.

En esta etapa se propone seguir el procedimiento descrito por Carrasco y Londa (2018) para preparar el hueso de coco, que será utilizado en la carbonización y activación química. En la figura A.1 se presenta la descripción detallada del procedimiento.

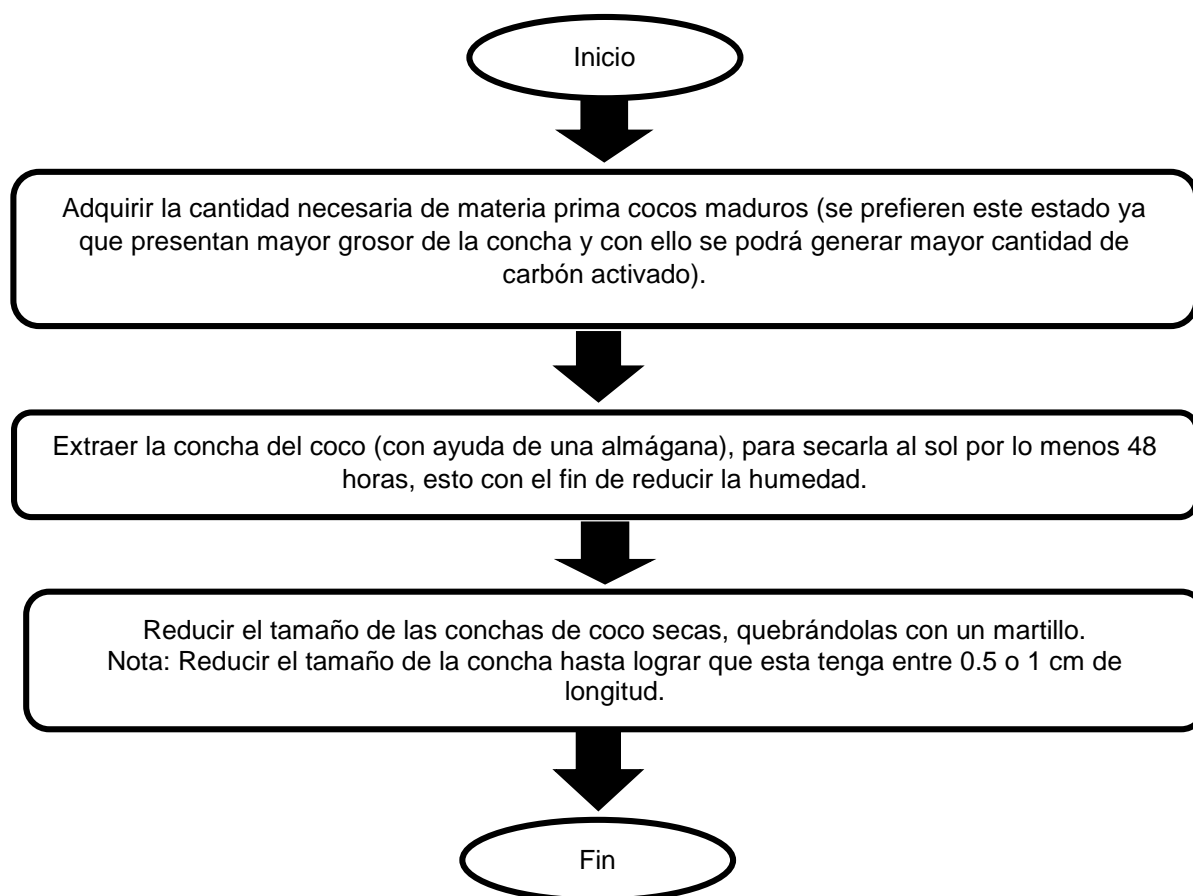


Figura A.1: Procedimiento para recolectar, secar y reducir el tamaño de la concha de coco. Fuente: Con base a la metodología adaptada por Carrasco y Londa (2018).

B. Etapa de activación química mediante ácido fosfórico al 85%.

Al igual que en la etapa anterior, se propone seguir el procedimiento descrito por Carrasco y Londa (2018) para la activación del carbón mediante el proceso químico, utilizando ácido fosfórico al 85% para impregnar el hueso de coco. Para desarrollar esta etapa se seguirá el procedimiento descrito en la figura A.2.

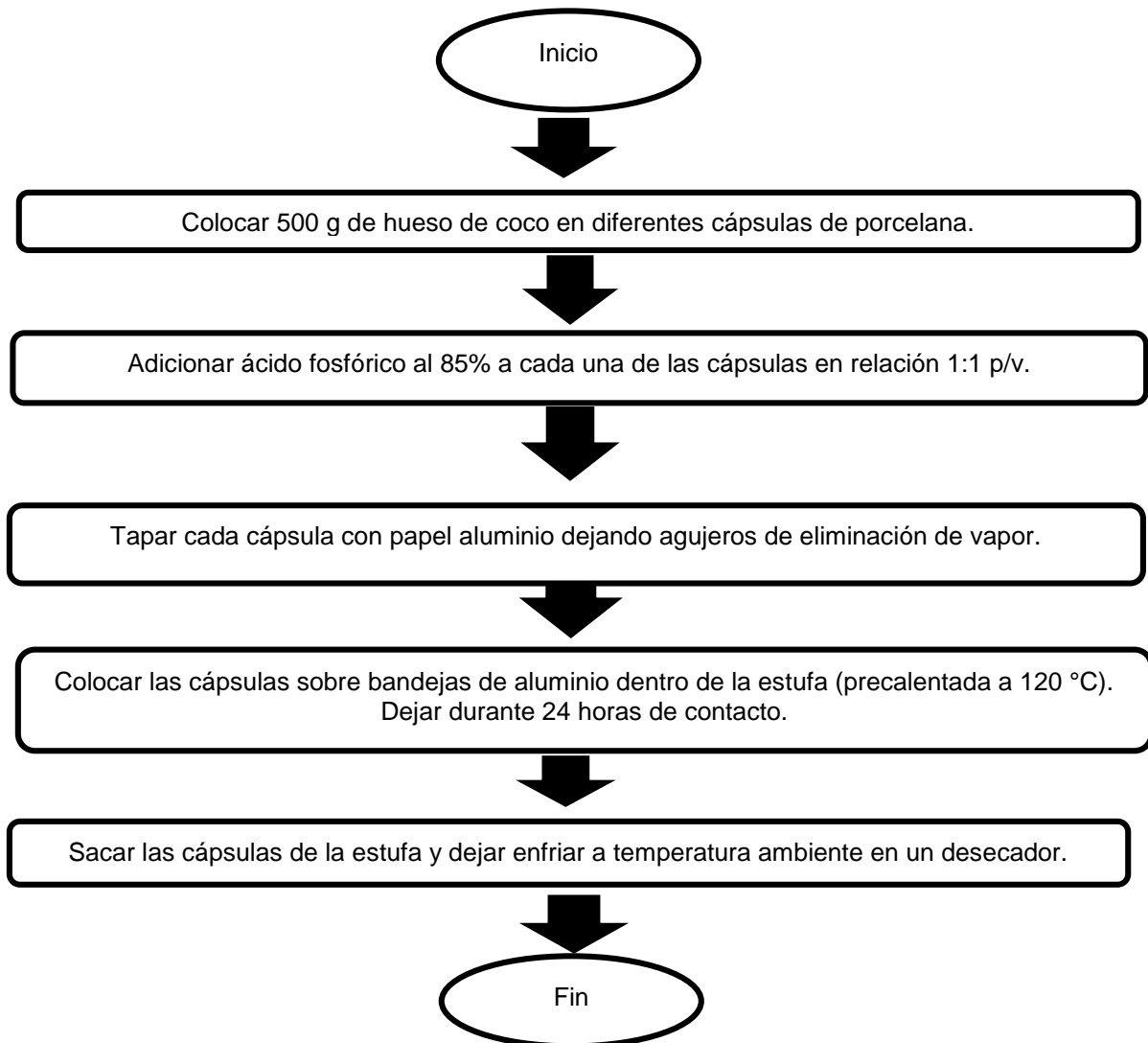


Figura A.2: Procedimiento para activar el carbón mediante el método químico utilizando ácido fosfórico al 85%. Fuente: Con base a la metodología adaptada por Carrasco y Londa (2018).

C. Etapa de lavado del carbón activado.

Para realizar el lavado del carbón activado se seguirá el procedimiento dictado por Carrasco y Londa (2018). En la figura A.3 se presentan los pasos a seguir durante el procedimiento.

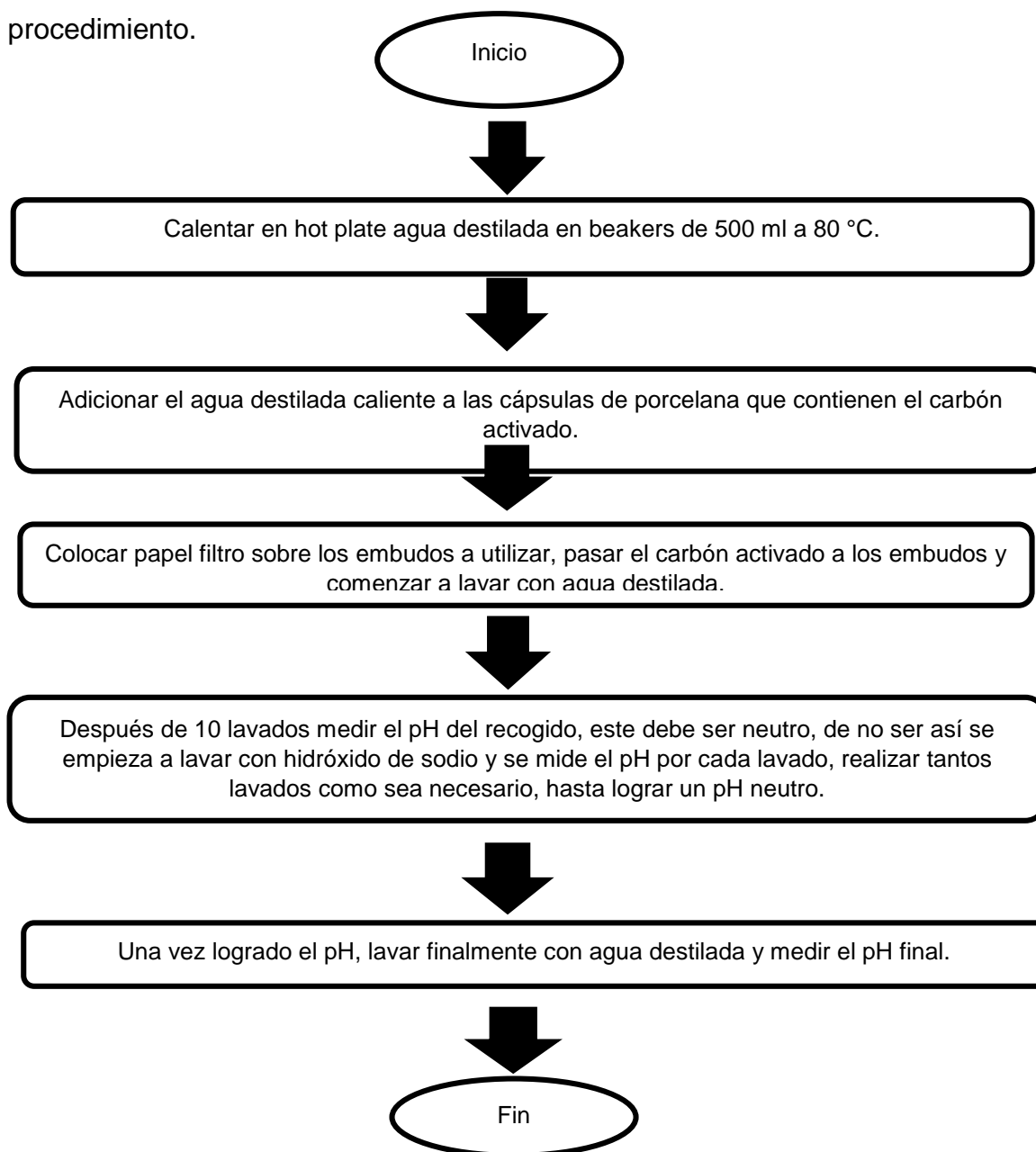
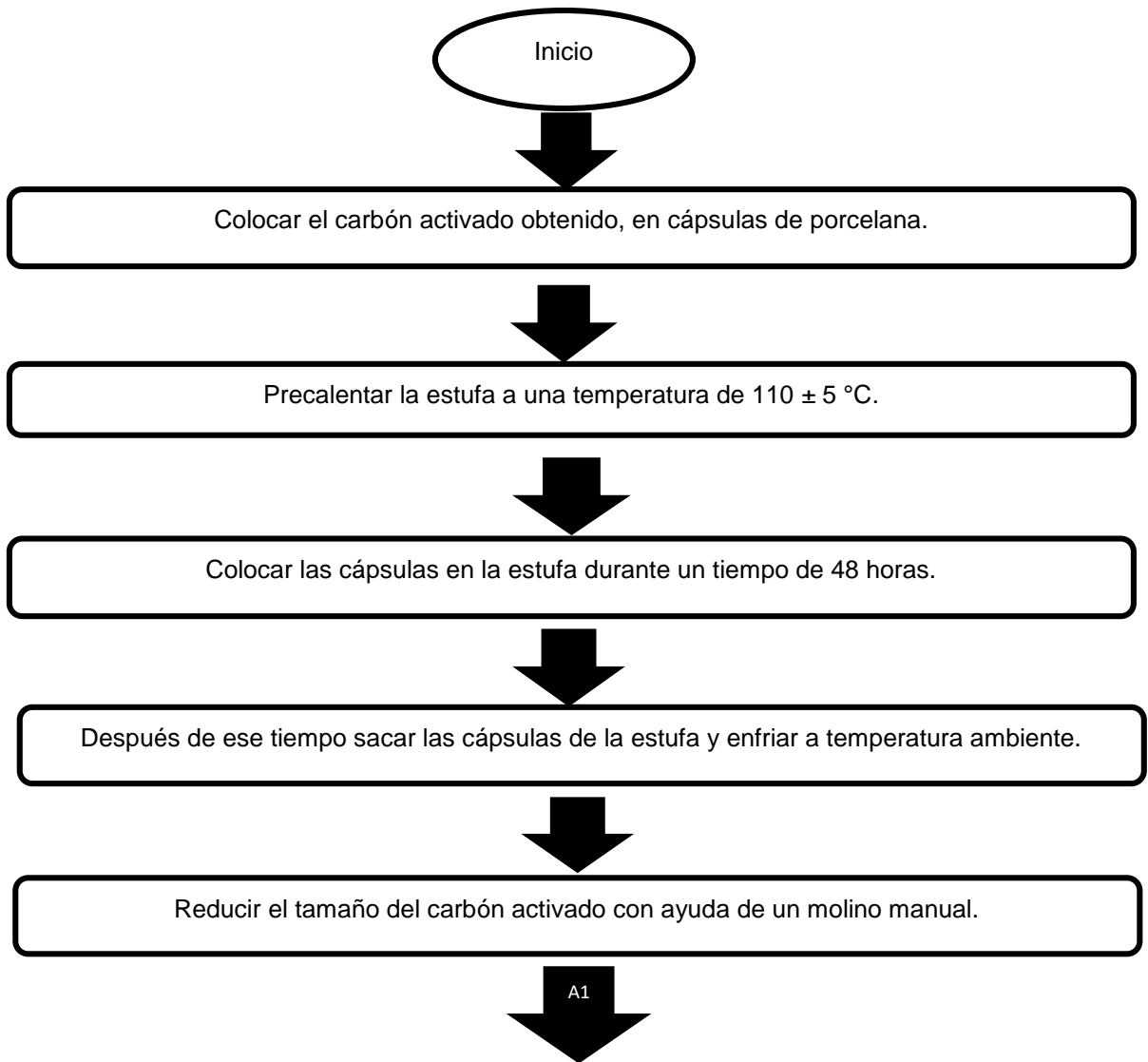


Figura A.3 Procedimiento para llevar a cabo el lavado del carbón activado.
Fuente: Con base a la metodología adaptada por Carrasco y Londa (2018).

D. Etapa de secado, reducción de tamaño y pesado del carbón activado.

Para llevar a cabo estas etapas se seguirá el procedimiento descrito por Carrasco y Londa (2018). En la figura A.4 se presentan los pasos a seguir durante el procedimiento.



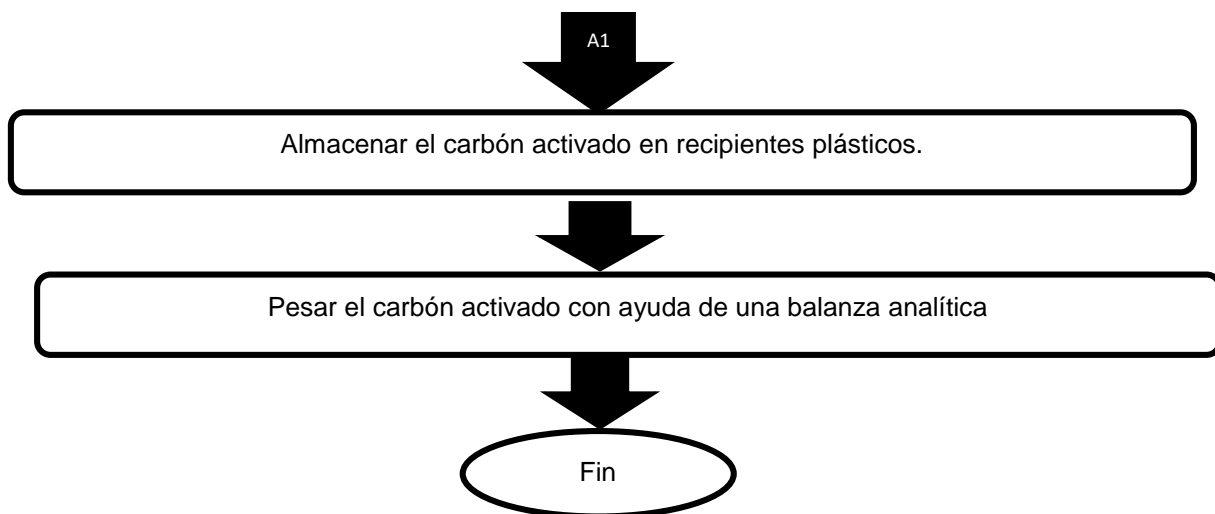


Figura A.4 Procedimiento para llevar a cabo el secado, reducción de tamaño y pesado del carbón activado. Fuente: Con base a la metodología adaptada por Carrasco y Londa (2018).

Cálculo del rendimiento experimental

Una vez obtenido el carbón de la estopa de coco, se obtendrá el rendimiento experimental utilizando la siguiente fórmula.

$$\% \text{ Rendimiento de la estopa de coco} = \frac{\text{Peso de la muestra después del proceso (g)}}{\text{Peso de la muestra antes del proceso (g)}} * 100$$

ANEXO 2. CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

En esta apartado se presentan los análisis físicos y químicos para caracterizar el carbón activado.

A. Determinación de la humedad

Se sigue el procedimiento descrito por la norma ASTM D2867-99 para determinar el contenido de humedad del carbón activado. En la figura A.5 se presentan los pasos a seguir durante esta prueba.

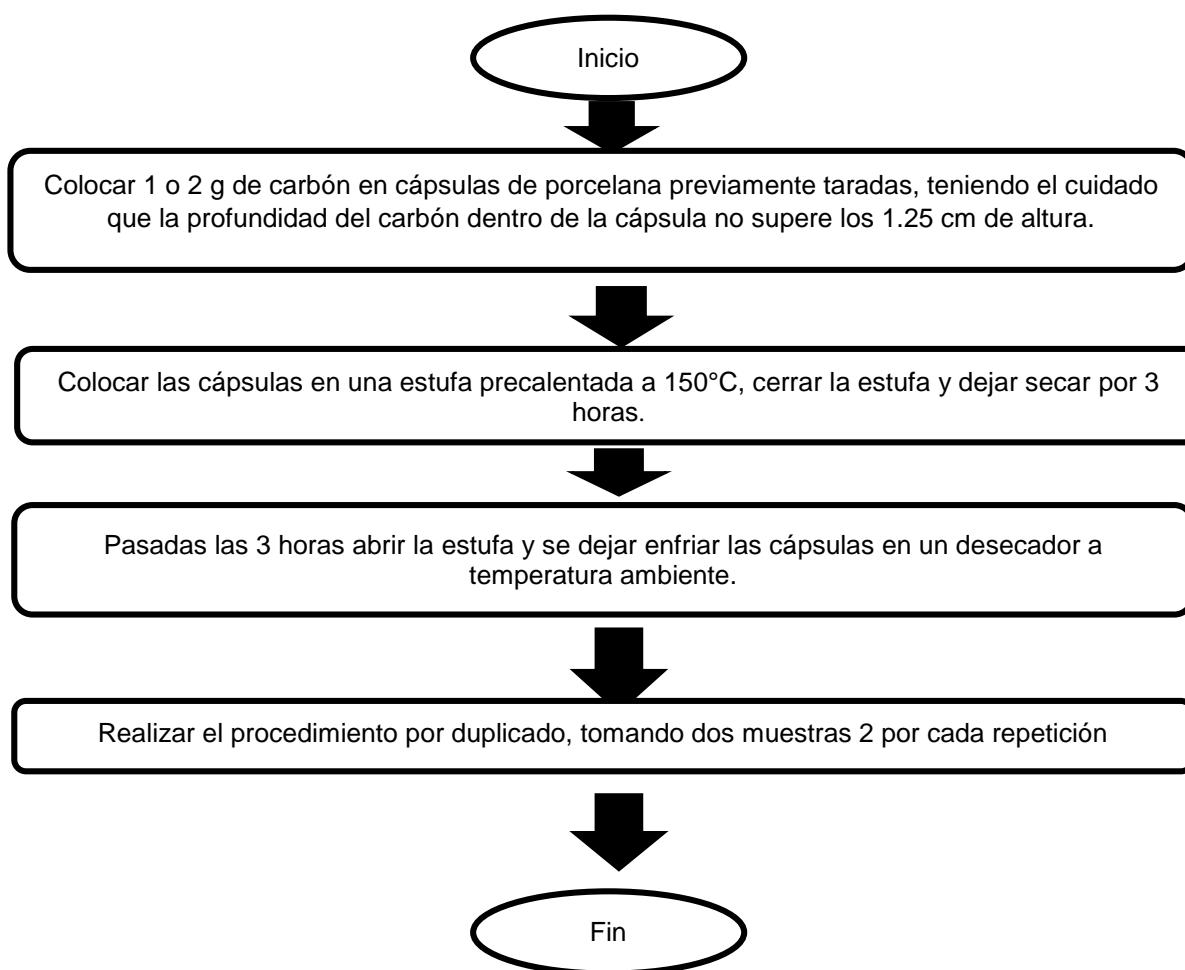


Figura A.5 Procedimiento para determinar el contenido de humedad en el carbón activado. Fuente: Con base a la norma ASTM D2867-99.

Cálculo del porcentaje de humedad.

El porcentaje de humedad se calculará con la siguiente fórmula.

$$\%H = \frac{C-D}{C-B} * 100$$

Donde:

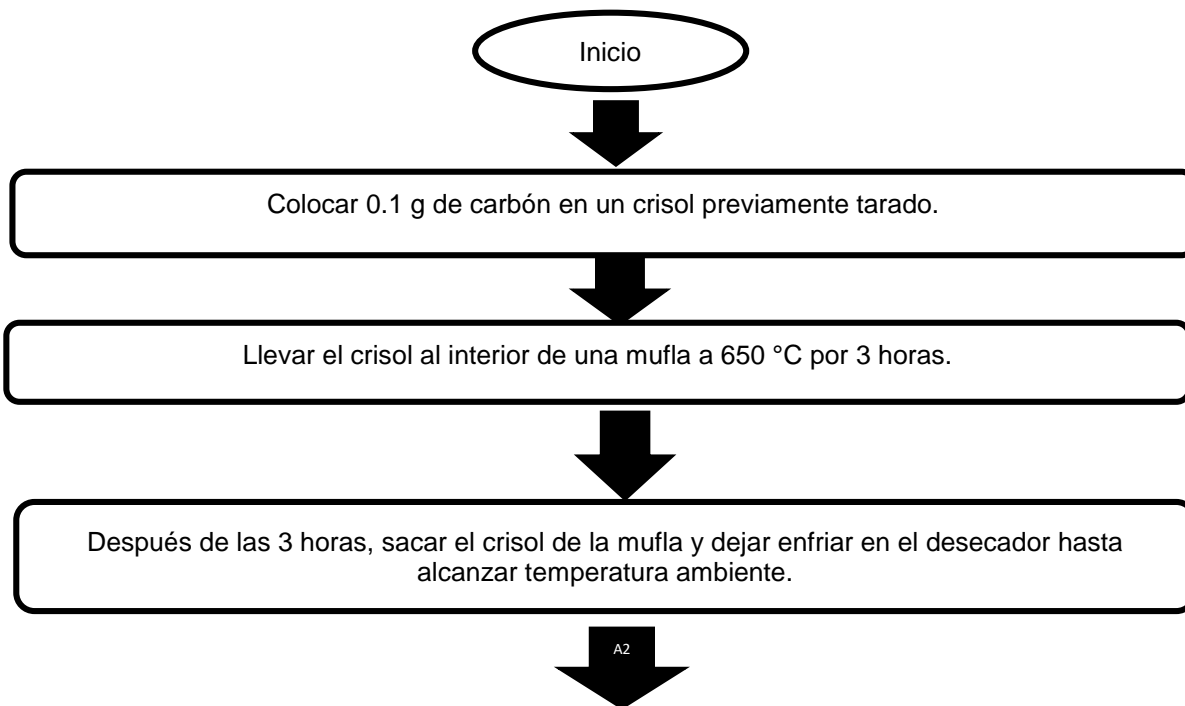
B = Peso de la cápsula vacía (g)

C = Peso de la cápsula más muestra inicial (g)

D = Peso de la cápsula más muestra seca (g)

B. Determinación del contenido de cenizas

Para determinar el contenido de cenizas se sigue el procedimiento de la norma ASTM D2866-94, cuyos pasos se describen en la figura A.6.



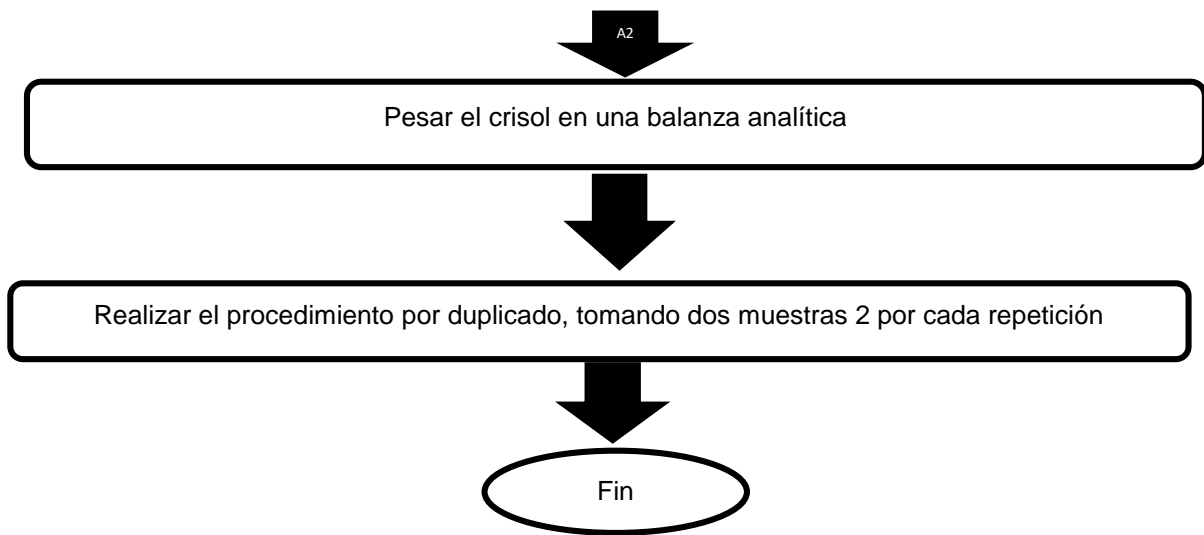


Figura A.6: Procedimiento para determinar el contenido de cenizas en el carbón activado. Fuente: Con base a la norma ASTM D2866-94.

Cálculo del contenido de cenizas.

Se calculará el contenido de cenizas con la siguiente ecuación.

$$\% \text{ Cenizas totales} = \frac{D-B}{C-B} * 100$$

Donde:

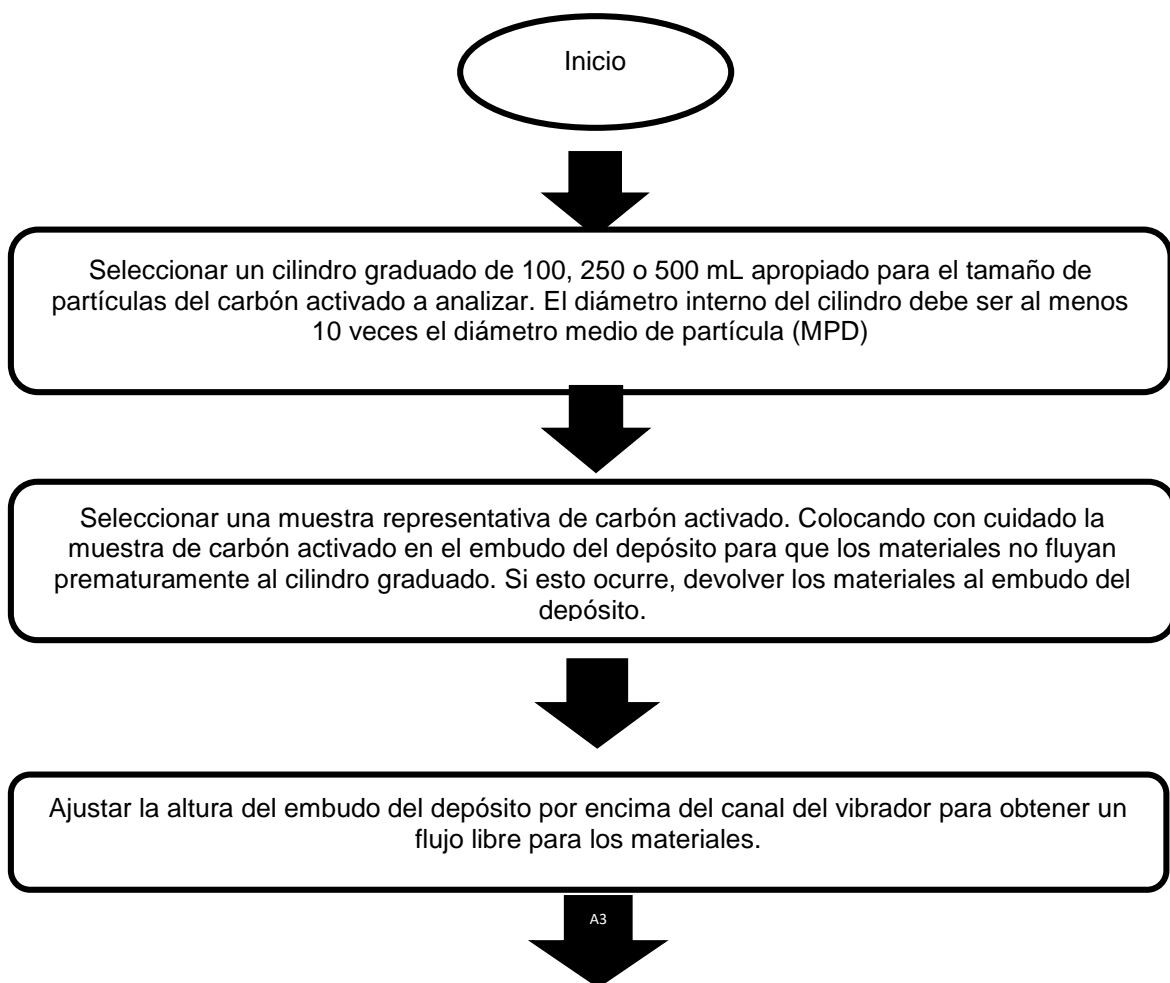
B = Peso del crisol vacío (g)

C = Peso del crisol más muestra inicial (g)

D = Peso del crisol más muestra incinerada (g)

C. Determinación de la densidad aparente.

Siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D2854-96 para el cálculo de la densidad aparente se determina para una muestra granular mediante la medición del volumen empaquetado por una caída libre desde un alimentador vibratorio en un cilindro graduado de tamaño apropiado y determinando la masa del volumen conocido.



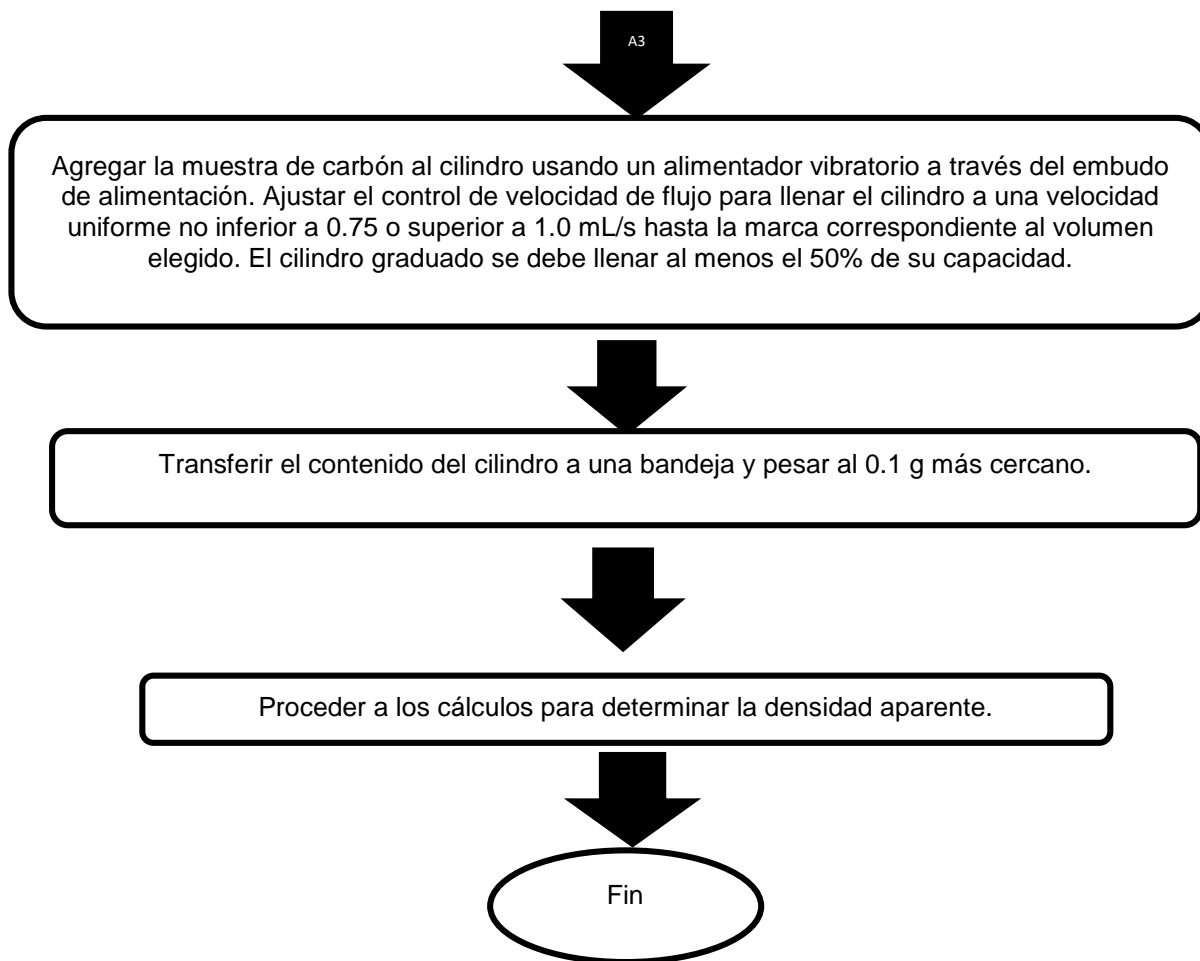


Figura A.7: Procedimiento para determinar la densidad aparente en el carbón activado. Fuente: Con base a la norma ASTM D-2854-96.

Calculo de la densidad aparente.

Se hace el cálculo con las siguientes ecuaciones:

$$D_{ar} = m_c / V_c$$

Donde:

D_{ar} = Densidad aparente recibida (g / mL).

m_c = Masa de carbón activado (g).

V_c = volumen de carbón (mL).

Posteriormente se procede al cálculo de la densidad aparente recibida en seco de la siguiente manera:

$$D_a = D_{ar} \left(1 - \% \frac{\text{humedad}}{100} \right)$$

Donde:

D_a = Densidad aparente seca (g/mL).

D_{ar} = densidad aparente recibida.

El porcentaje de humedad se determina utilizando la norma ASTM D2867.

D. Determinaciones granulométricas.

Para la realización del análisis granulométrico como para los cálculos posteriores se prosigue de acuerdo a la norma ASTM D2862-97.

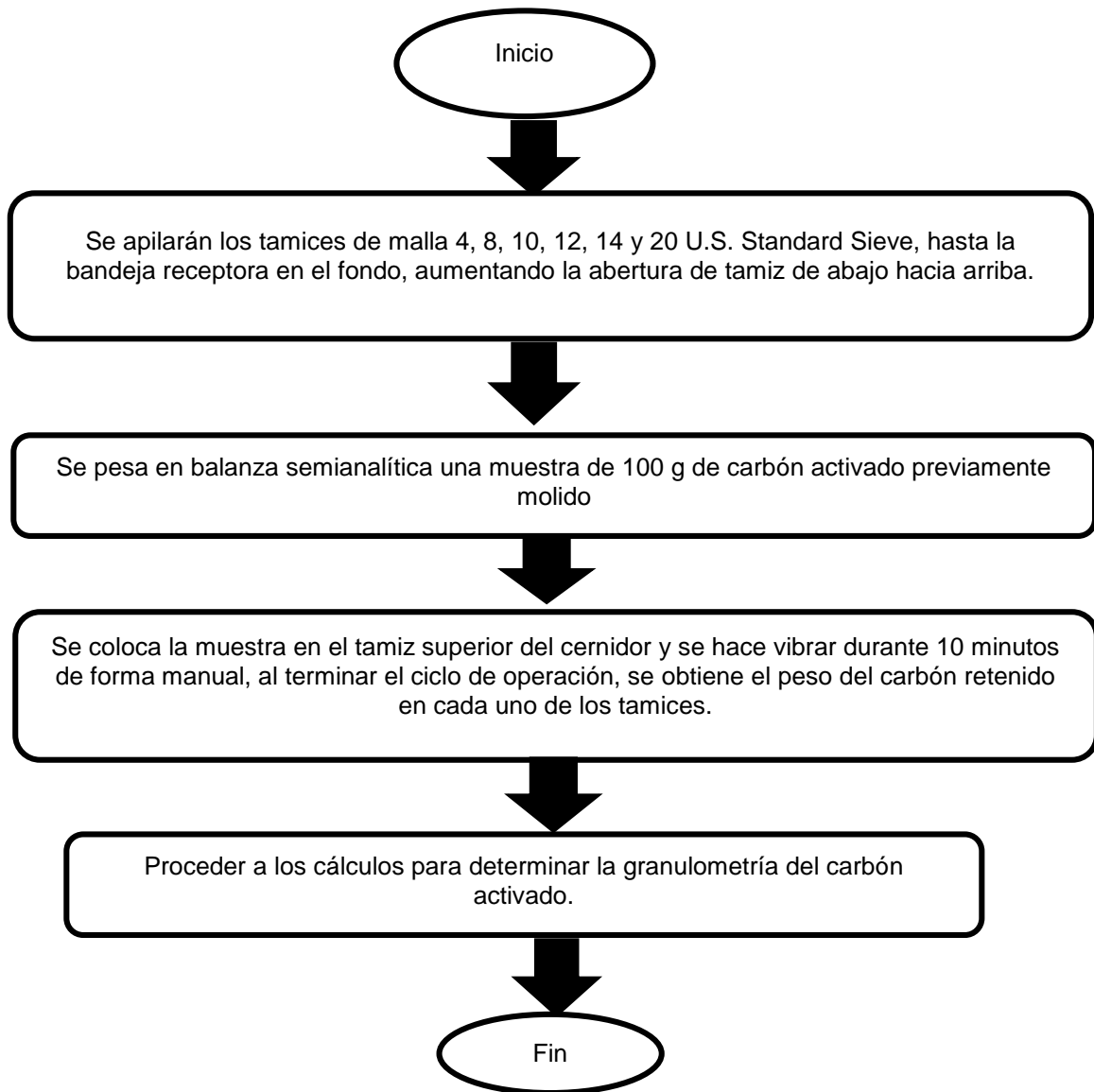


Figura A.8: Procedimiento para determinación de análisis granulométrico en el carbón activado. Fuente: Con base a la norma ASTM D2862-97.

Cálculos de granulometría.

Se calcula el porcentaje retenido mediante la Ecuación siguiente:

$$\%retenido: \left(\frac{P_{ca_t}}{P_i} \right) \times 100$$

Donde:

P_{ca_t} = peso del carbón retenido en el tamiz.

P_i = peso inicial del carbón activado.

Además, se calcula el diámetro efectivo de partícula (mm) y el coeficiente de uniformidad con las siguientes ecuaciones, respectivamente.

Para el diámetro efectivo de partícula (Dep):

$$Dep = \frac{\sum \text{peso retenido}}{100}$$

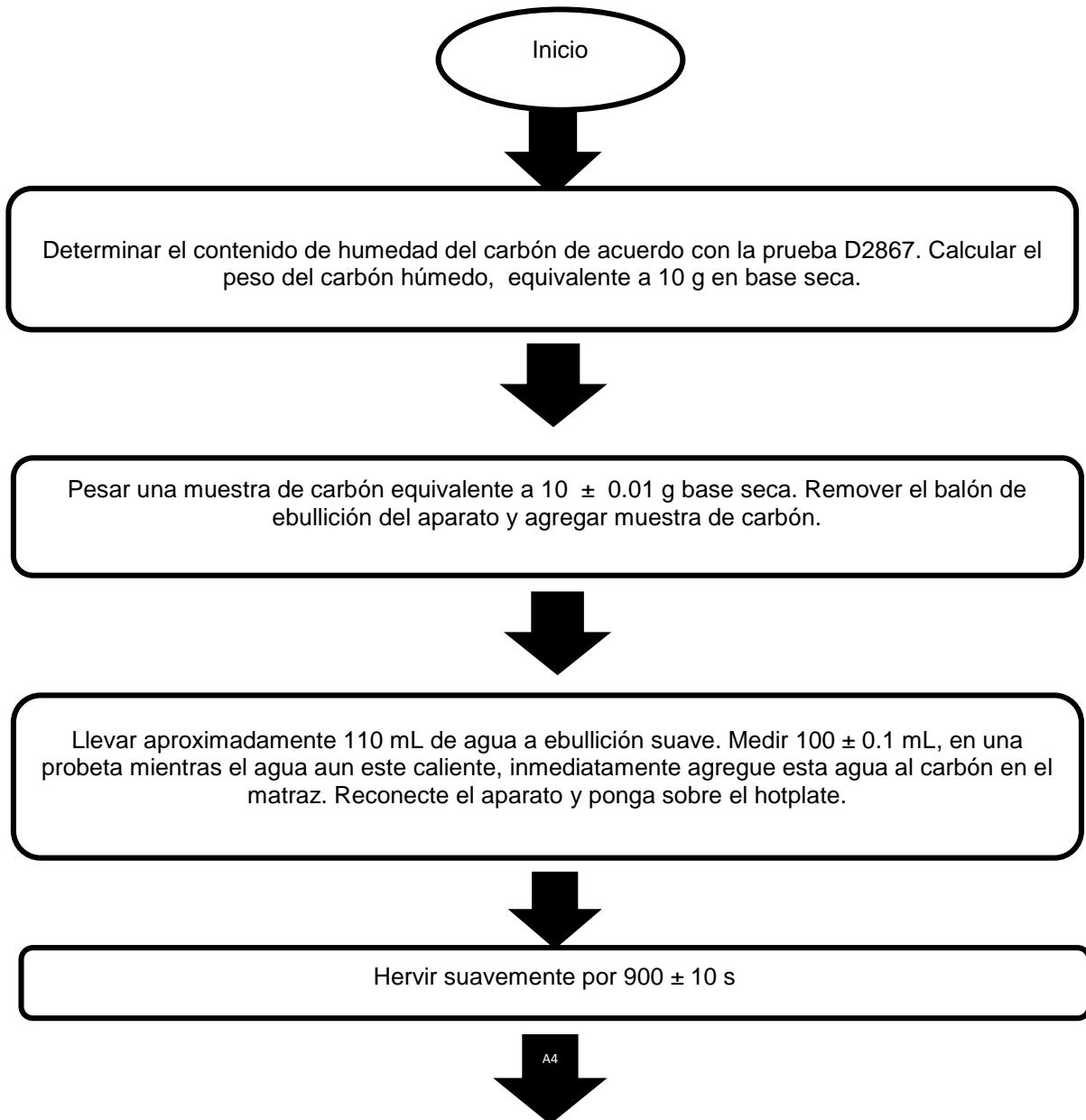
Para el coeficiente de uniformidad (Cu):

$$Cu = \frac{\text{Valor (mm) del 60\% pasante}}{\text{Valor (mm) del 10\% pasante}}$$

En donde el valor del 60% y 10 % pasantes son leídos en la curva de granulométrica obtenida. En cuanto al coeficiente de uniformidad, si éste es 1.0 se considera que todas las partículas son perfectamente iguales, hasta 3.0 se consideran como el tamaño de partícula como muy uniforme, mientras se va incrementando el valor las partículas disminuyen en uniformidad.

E. Determinación del pH

Esta prueba determina el pH del extracto de agua del carbón activado, según la ASTM D3838-80.



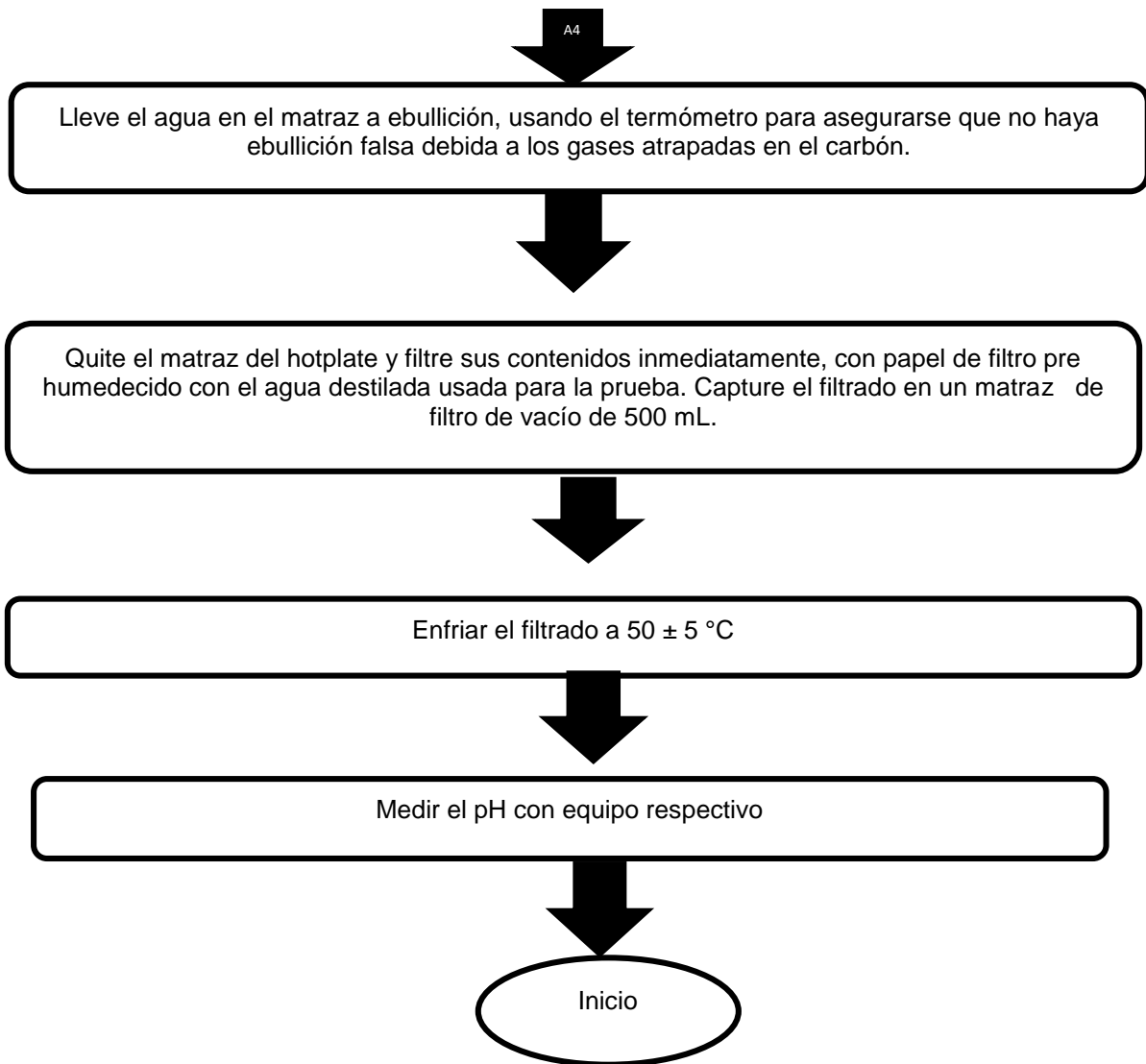
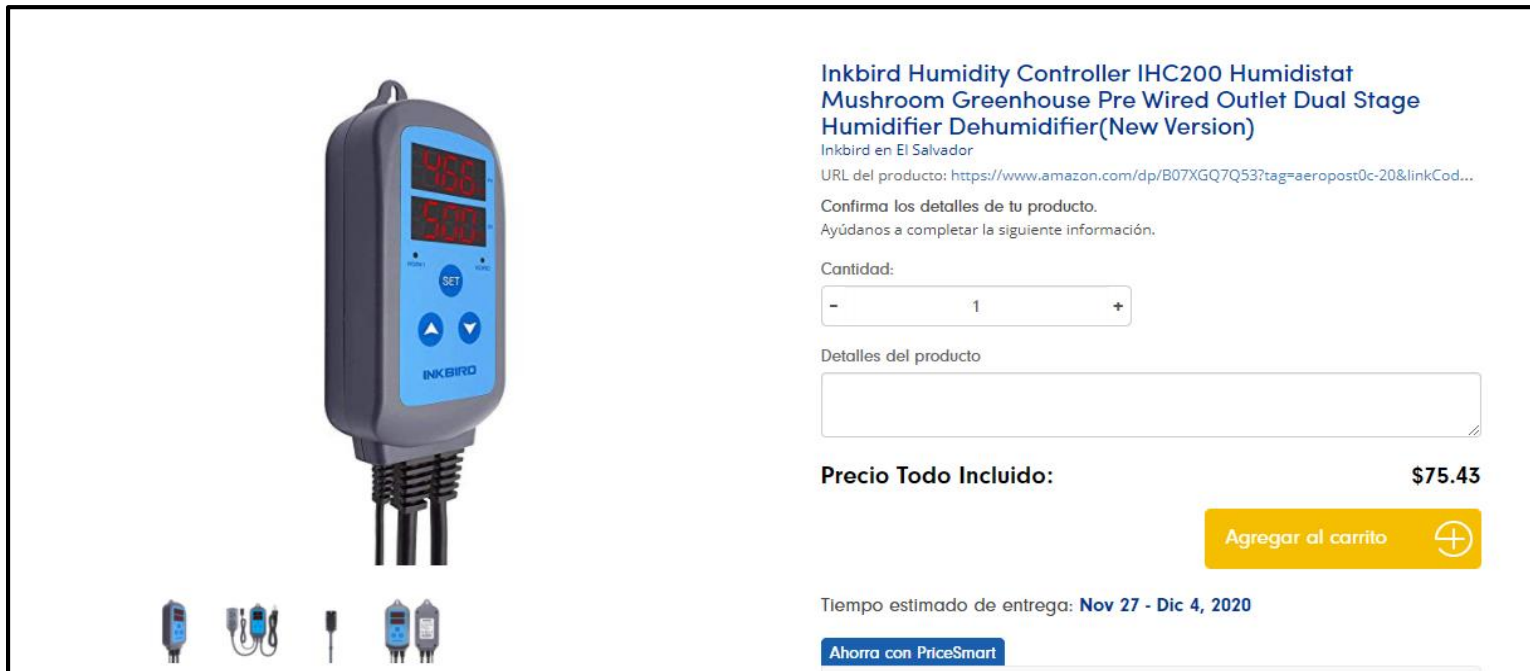


Figura. A.9: Procedimiento para determinación de pH en carbón activado Fuente: Con base a la norma ASTM D3838-80.

ANEXO 3. ESTIMADO DE COTIZACIONES DE EQUIPOS SELECCIONADOS PARA LA CAMARA DE CALIBRACION.

Para la búsqueda de las cotizaciones figuras A.10, A.11; A.12 se buscó primero el producto en la tienda donde se encontraba disponible, luego se creó una cuenta en www.aeropost.com, para obtener el precio final al recibirlo en El Salvador.



The screenshot displays the Amazon product page for the Inkbird Humidity Controller IHC200. On the left, there is a large image of the device, which is a blue and grey rectangular unit with a digital display showing '45.5' and '50.0'. Below the main image are smaller icons representing different accessories or components. On the right side of the page, the product title is 'Inkbird Humidity Controller IHC200 Humidistat Mushroom Greenhouse Pre Wired Outlet Dual Stage Humidifier Dehumidifier(New Version)'. Below the title, it says 'Inkbird en El Salvador' and provides a URL. There is a section for quantity with a dropdown menu set to '1'. Below that is a 'Detalles del producto' section with a text area. The price is listed as 'Precio Todo Incluido: \$75.43'. A yellow button labeled 'Agregar al carrito' with a plus sign icon is visible. At the bottom, it shows the estimated delivery time as 'Nov 27 - Dic 4, 2020' and a 'Ahorra con PriceSmart' badge.

Figura A.10: Cotización estimada de equipo control de humedad Inkbird IHC200 Cotizado el 24 de noviembre de 2020 en: <https://www.amazon.com>.



Airthings 223 Corentium Home Radon Detector (1 Pack)
Airthings en El Salvador
URL del producto: <https://www.amazon.com/dp/B00H2VOSP8?tag=aeropost0c-20&linkCode...>

Confirma los detalles de tu producto.
Ayúdanos a completar la siguiente información.

Cantidad:
- 1 +

Detalles del producto

Precio Todo Incluido: **\$226.14**

Agregar al carrito 

Tiempo estimado de entrega: **Nov 27 - Dic 4, 2020**

Figura A.11: Cotización estimada de equipo para monitoreo de radón Airthings 223 Corentium Home Radon Detector. Cotizado el 24 de noviembre de 2020 en: <https://www.amazon.com>.



iPower Under Tank Heat pad and Digital Thermostat Combo Set for Reptiles
El Salvador
URL del producto: <https://www.amazon.com/dp/B084W3RP5H?tag=aeropost0c-20&linkCod...>

Confirma los detalles de tu producto.
Ayúdanos a completar la siguiente información.

Cantidad: Tamaño:


Detalles del producto

Precio Todo Incluido: **\$69.48**

Agregar al carrito

Tiempo estimado de entrega: **Nov 27 - Dic 4, 2020**

Figura A.12: Equipo termostato con manta calefactora iPower Under Tank Heat Pad. Cotizado el 24 de noviembre de 2020 en: <https://www.amazon.com>.



Rossmax
Rossmax Nebulizador Atomizador

Número de ítem: 320097

\$46.99

Estás viendo: ✖ Fuera de inventario
[Santa Elena](#)
Cambiar club

Disponible para
✔ Los Héroes ✖ Santa Elena

Figura A.13: Equipo nebulizador Rossmax utilizado en cámara de calibración como humidificador. Cotizado el 24 de noviembre de 2020 en: <https://www.pricesmart.com>.

ANEXO 4. GESTIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS.

A. Gestión de residuos líquidos.

Un tipo de residuos cuya gestión supone problemas importantes son los líquidos de centelleo formados por disolventes orgánicos: benceno, tolueno, xileno, etc. Su contaminación radiactiva es baja debido principalmente a H^3 y C^{14} , pero sus componentes no radiactivos son tóxicos (cancerígenos), volátiles e inflamables. Estos residuos se gestionan como radiactivos aun siendo el riesgo radiológico menor que su riesgo tóxico.

Para el caso del tratamiento de estos residuos líquidos generados por la puesta en marcha de la metodología, específicamente para el coctel de centelleo que se genera luego de su utilización en la medición de concentración de radón en carbón activado en el equipo de centelleo líquido y espectrometría gamma se pueden tratar siguiendo los siguientes criterios (Universidad de Valladolid, 2001)

I. Líquidos acuosos u orgánicos de baja toxicidad o biodegradables:

En todos estos casos, y siempre que el isótopo en cuestión tenga un período de semidesintegración superior a 100 días, la vía de gestión será mediante el vertido controlado a través de una pila vertedero emplazada dentro de la instalación, determinando previamente que la actividad específica no supere los valores permisibles. A tal fin, en caso de que no se conozca con precisión, se ha de tomar una alícuota para proceder a la determinación de la actividad específica del residuo. Debe documentarse tanto el proceso de determinación de la actividad como también las fechas y el volumen del vertido, el radionucleido contaminante y la actividad específica. Además del condicionado de tipo dosimétrico, para proceder al vertido por el desagüe se han de garantizar los siguientes criterios:

- a. El líquido vertido, marcado con material radiactivo, ha de ser soluble o bien fácilmente dispersable en el agua.
- b. Los residuos se han de arrastrar con una buena corriente de agua. (>300 L/h)
- c. El líquido vertido no ha de entrañar ningún otro riesgo de tipo químico o biológico que impida su evacuación.

II. Residuos líquidos de baja actividad específica conteniendo radionucleidos de período de semidesintegración corto o medio ($T_{1/2} < 100$ días)

Estos residuos serán almacenados transitoriamente en el laboratorio en un área destinada para su almacenamiento, hasta que su actividad decaiga por debajo de los límites de actividad específica legalmente establecidos. Su almacenamiento tendrá lugar en recipientes de plástico o vidrio cerrados herméticamente dentro de una bolsa convenientemente etiquetada en la que figurará el número de lote, la fecha de entrada y la fecha prevista para su evacuación. Estas bolsas se almacenarán, convenientemente protegidas, en los armarios destinados a tal fin, una vez desclasificados, a través del vertido controlado por el desagüe, diluyéndolos al menos 10 veces, si el líquido es soluble en agua y no entraña ningún otro riesgo químico o biológico.

III. Residuos líquidos de media actividad específica:

Este grupo está formado por los residuos líquidos que presenten una actividad específica superior a la indicada en el apartado anterior. El proceso a seguir, además de depender del valor de la actividad específica, estará también condicionado por los períodos de semidesintegración ($T_{1/2}$) del radionucleido contaminante. A tal fin se determina el cociente entre el Límite ya definido de

Actividad Específica (*LAE*) y la actividad específica del residuo, resultando el denominado Factor de Decrecimiento (*FD*) de la actividad:

$$FD = LAE / \text{Activ. Espec. Actual}$$

A continuación se indica el tiempo que ha de transcurrir, expresado en número de períodos de semidesintegración, (N° de $T_{1/2}$), para conseguir el valor de *FD* necesario para que los residuos sean considerados de baja actividad y recibir el tratamiento como tales:

Tabla A.1: Tiempo necesario para conseguir un Factor de Decrecimiento que indique que el residuo es de baja actividad.

FD	Nº de T1/2	FD	Nº de T1/2
1	0	3.0×10^{-2}	5
0.5	1	7.8×10^{-3}	7
0.25	2	9.7×10^{-4}	10
0.125	3	3.0×10^{-5}	15
0.0625	4	9.5×10^{-7}	20

Donde $FD = 2^{-(N^{\circ} \text{ de } T_{1/2})}$ o lo que es lo mismo, $N^{\circ} \text{ de } T_{1/2} = -\ln(FD) / \ln 2$

Fuente: (Universidad de Valladolid, 2001).

Hasta que se alcancen los niveles de actividad que permita considerar a los residuos como “de baja actividad”, estos se han de tener guardados en el almacén de residuos radiactivos. Posteriormente se efectuará su vertido controlado (si ello es aplicable), garantizando que la su actividad específica sea inferior al Límite de Actividad Específica (*LAE*). Como criterio general, en caso que el tiempo de decrecimiento deba ser inferior a 3 años, una vez transcurrido el período, el residuo se podrá gestionar como residuo de baja actividad específica, siguiendo las pautas mencionadas en el apartado correspondiente.

IV. Viales de centelleo

El procesado de los viales de centelleo será el siguiente:

- a. Se utilizará un líquido de centelleo miscible o dispersable en agua y biodegradable.
- b. Tras ser contados, después de los experimentos, se evacuará el líquido de los viales a través del desagüe de vertidos, diluyendo convenientemente y de forma controlada.
- c. En los viales húmedos, se calcula que podría conservarse un 10% de la actividad inicial.
- d. Se sumergen estos viales en una solución comercial de detergente-secuestrante específica para radiactividad, en la que los viales perderían como mínimo el 90% (según especificaciones) de su contenido radiactivo.
- e. A continuación, una vez secos, los viales serán desclasificados, inutilizados y desechados como basura convencional, sin signos externos de radiactividad.

ANEXO 5. CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN DE FORMULARIOS Y MACROS AUTOMATIZADAS EN EL PROGRAMA KEMRADÓN-CIAN.

```

Private Sub cmdcalcular_Click()
txthumedad.Text = Val((txtmuestra.Value - txtpesom.Value) / (txtmuestra.Value - txtvacio.Value)) * 100
End Sub
Private Sub CommandButton1_Click()

ultimacelda = ActiveSheet.Cells(Rows.Count, "F").End(xlUp).Row + 1
Range("F" & ultimacelda).EntireRow.Insert
Range("F" & ultimacelda).Value = txtcarbon.Value
Range("G" & ultimacelda).Value = txtvacio.Value
Range("H" & ultimacelda).Value = txtmuestra.Value
Range("I" & ultimacelda).Value = txtpesom.Value
Range("J" & ultimacelda).Value = txthumedad.Text

End Sub
Private Sub CommandButton2_Click()

Me.txtcarbon.Value = " "
Me.txtvacio.Value = " "
Me.txtmuestra.Value = " "
Me.txtpesom.Value = " "
Me.txthumedad.Value = " "
End Sub

```

Figura A.14: Código de formulario en VBA para determinar el porcentaje de humedad de una muestra de carbón activado.

```

Private Sub cmdcal_Click()
txtct.Text = Val((txtmi.Value - txtcv.Value) / (txtcm.Value - txtcv.Value)) * 100
End Sub
Private Sub CommandButton1_Click()

last1 = ActiveSheet.Cells(Rows.Count, "E").End(xlUp).Row + 1
Range("E" & last1).EntireRow.Insert
Range("E" & last1).Value = txtca.Value
Range("F" & last1).Value = txtcv.Value
Range("G" & last1).Value = txtcm.Value
Range("H" & last1).Value = txtmi.Value
Range("I" & last1).Value = txtct.Text
End Sub
Private Sub CommandButton3_Click()

txtca.Value = ""
txtcv.Value = ""
txtcm.Value = ""
txtmi.Value = ""
txtct.Value = ""
End Sub

```

Figura A.15: Código de formulario en VBA para determinar el contenido de cenizas en carbón activado.

```

Private Sub CommandButton1_Click()
txtdensi.Text = Val(txtmasal.Value / txtvolumen1.Value)
End Sub
Private Sub CommandButton2_Click()

txtmasal.Value = ""
txtvolumen1.Value = ""
txtdensi.Value = ""
End Sub
Private Sub CommandButton3_Click()
lastdensi = ActiveSheet.Cells(Rows.Count, "E").End(xlUp).Row + 1

Range("E" & lastdensi).EntireRow.Insert
Range("E" & lastdensi).Value = txtmasal.Value
Range("F" & lastdensi).Value = txtvolumen1.Value
Range("G" & lastdensi).Value = txtdensi.Text
End Sub

```

Figura A.16: Programación en VBA para calcular la densidad aparente de carbón activado.

Densidad aparente de tierra

Peso de tierra que cabe en el cilindro (g)

Volumen del cilindro (mL) (recomendado por norma ASTM D2854-96)

Densidad aparente de tierra (g/mL)

Calcular

Concentración inicial de radio en tierra

Volumen de solución de radio (mL)

Concentración de actividad de solución de solución de radio (Bq/mL)

Cantidad de tierra emanadora (g)

Concentración inicial de radio en tierra (Bq/g)

Concentración final de radio en tierra (Bq/g)

Calcular

Agregar datos

Limpiar datos

Figura A.17: Formulario de ingreso de datos y código VBA para determinar la densidad y concentración de radón en tierra.

```

Private Sub CommandButton1_Click()
txtdensidad.Text = Val(txtcilindro.Value / txtvcilindro.Value)
End Sub

Private Sub CommandButton2_Click()
txtinicial.Text = Val((txtvradio.Value * txtsolucion.Value) / txttierra.Value)
End Sub

Private Sub CommandButton3_Click()
lastchange = ActiveSheet.Cells(Rows.Count, "A").End(xlUp).Row + 1
Range("A" & lastchange).EntireRow.Insert

Range("A" & lastchange).Value = txtcilindro.Value
Range("B" & lastchange).Value = txtvcilindro.Value
Range("C" & lastchange).Value = txtdensidad.Text
Range("D" & lastchange).Value = txtvradio.Value
Range("E" & lastchange).Value = txtsolucion.Value
Range("F" & lastchange).Value = txttierra.Value
Range("G" & lastchange).Value = txtinicial.Text
Range("H" & lastchange).Value = txtfinal.Value

End Sub

Private Sub CommandButton4_Click()
txtcilindro.Value = " "
txtvcilindro.Value = " "
txtdensidad.Value = " "
txtvradio.Value = " "
txtsolucion.Value = " "
txttierra.Value = " "
txtinicial.Value = " "
txtfinal.Value = " "
End Sub

```

Figura A.17: Formulario de ingreso de datos y código VBA para determinar la densidad y concentración de radón en tierra (Continuación).

```

Private Sub CommandButton1_Click()

last2 = ActiveSheet.Cells(Rows.Count, "A").End(xlUp).Row + 1
Range("A" & last2).EntireRow.Insert
Range("A" & last2).Value = txt1.Value
Range("B" & last2).Value = txt2.Value
Range("C" & last2).Value = txt3.Value
Range("D" & last2).Value = txt4.Value
Range("E" & last2).Value = txt5.Value
Range("F" & last2).Value = txt6.Value
Range("G" & last2).Value = txt7.Value
Range("H" & last2).Value = txt8.Value
Range("I" & last2).Value = txt9.Value
Range("J" & last2).Value = txttdm.Value
Range("K" & last2).Value = txttc.Value
Range("L" & last2).Value = txtcuentad.Value
Range("M" & last2).Value = txtcdispositivo.Value
Range("N" & last2).Value = txtpesoan.Value
Range("O" & last2).Value = txtpesod.Value

End Sub

```

Figura A.18: Programación en VBA de la hoja de datos de la calibración de la metodología.

```

Private Sub UserForm_Initialize()

txt5.AddItem "Roca"
txt5.AddItem "Tierra impregnada de solución de radio"
txt5.AddItem "Gasa impregnada"

txt6.AddItem "D1-AN1"
txt6.AddItem "D1-AN2"
txt6.AddItem "D1-AN3"
txt6.AddItem "D1-AN4"
txt6.AddItem "D1-AN5"
txt6.AddItem "D1-AN6"

txt6.AddItem "D2-AZ1"
txt6.AddItem "D2-AZ2"
txt6.AddItem "D2-AZ3"
txt6.AddItem "D2-AZ4"
txt6.AddItem "D2-AZ5"
txt6.AddItem "D2-AZ6"

txt6.AddItem "D3-VD1"
txt6.AddItem "D3-VD2"
txt6.AddItem "D3-VD3"
txt6.AddItem "D3-VD4"
txt6.AddItem "D3-VD5"
txt6.AddItem "D3-VD6"

txt6.AddItem "D4-AM1"
txt6.AddItem "D4-AM2"
txt6.AddItem "D4-AM3"
txt6.AddItem "D4-AM4"
txt6.AddItem "D4-AM5"
txt6.AddItem "D4-AM6"

txt6.AddItem "D5-NG1"
txt6.AddItem "D5-NG2"

txt6.AddItem "D5-NG3"
txt6.AddItem "D5-NG4"
txt6.AddItem "D5-NG5"
txt6.AddItem "D5-NG6"

```

Figura A.18: Programación en VBA de la hoja de datos de la calibración de la metodología (Continuación).

```
txt6.AddItem "D5-NG3"  
txt6.AddItem "D5-NG4"  
txt6.AddItem "D5-NG5"  
txt6.AddItem "D5-NG6"  
  
txt6.AddItem "D6-RJ1"  
txt6.AddItem "D6-RJ2"  
txt6.AddItem "D6-RJ3"  
txt6.AddItem "D6-RJ4"  
txt6.AddItem "D6-RJ5"  
txt6.AddItem "D6-RJ6"  
  
txt6.AddItem "D7-MR1"  
txt6.AddItem "D7-MR2"  
txt6.AddItem "D7-MR3"  
txt6.AddItem "D7-MR4"  
txt6.AddItem "D7-MR5"  
txt6.AddItem "D7-MR6"  
  
txt7.AddItem "Anaranjado-primer dia de extracción"  
txt7.AddItem "Azul-segundo dia de extracción"  
txt7.AddItem "Verde-tercer dia de extracción"  
txt7.AddItem "Amarillo-cuarto dia de extracción"  
txt7.AddItem "Negro-quinto dia de extracción"  
txt7.AddItem "Rojo-sexto dia de extracción"  
txt7.AddItem "Morado-septimo dia de extracción"  
  
txt8.AddItem "Primero"  
txt8.AddItem "Segundo"  
txt8.AddItem "Tercero"  
txt8.AddItem "Cuarto"  
txt8.AddItem "Quinto"  
txt8.AddItem "Sexto"  
txt8.AddItem "Septimo"  
  
End Sub
```

Figura A.18: Programación en VBA de la hoja de datos de la calibración de la metodología (Continuación).

```

Private Sub CommandButton1_Click()
ultimafila = ActiveSheet.Cells(ActiveSheet.Rows.Count, "A").End(xlUp).Row + 1
Range("A" & ultimafila).EntireRow.Insert

Range("A" & ultimafila).Value = txtf1.Value
Range("B" & ultimafila).Value = txtf2.Value
Range("C" & ultimafila).Value = txth1.Value
Range("D" & ultimafila).Value = txth2.Value
Range("E" & ultimafila).Value = txtcl.Value
Range("F" & ultimafila).Value = txtnl.Value
Range("G" & ultimafila).Value = txtel.Value
Range("H" & ultimafila).Value = txtvl.Value
Range("I" & ultimafila).Value = txtcul.Value
Range("J" & ultimafila).Value = txthul.Value
Range("K" & ultimafila).Value = txtol.Value
Range("L" & ultimafila).Value = txt99.Value
Range("M" & ultimafila).Value = txt101.Value

End Sub
Private Sub CommandButton2_Click()
Me.txtf1.Value = " "
Me.txtf2.Value = " "
Me.txth1.Value = " "
Me.txth2.Value = " "
Me.txtcl.Value = " "
Me.txtnl.Value = " "
Me.txtel.Value = " "
Me.txtvl.Value = " "
Me.txtcul.Value = " "
Me.txthul.Value = " "
Me.txtol.Value = " "
Me.txt99.Value = " "
Me.txt101.Value = " "

End Sub

```

Figura A.19: Programación en VBA de la hoja de datos para muestreo de radón en viviendas o edificios.


```

Private Sub UserForm_Initialize()

Me.txtcl.AddItem "DLV001"
Me.txtcl.AddItem "DLV002"
Me.txtcl.AddItem "DLV003"
Me.txtcl.AddItem "DLV004"
Me.txtcl.AddItem "DLV005"
Me.txtcl.AddItem "DLV006"
Me.txtcl.AddItem "DLV007"
Me.txtcl.AddItem "DLV008"
Me.txtcl.AddItem "DLV009"
Me.txtcl.AddItem "DLV010"
Me.txtcl.AddItem "DLV011"
Me.txtcl.AddItem "DLV012"
Me.txtcl.AddItem "DLV013"
Me.txtcl.AddItem "DLV014"
Me.txtcl.AddItem "DLV015"
Me.txtcl.AddItem "DLV016"
Me.txtcl.AddItem "DLV017"
Me.txtcl.AddItem "DLV018"
Me.txtcl.AddItem "DLV019"
Me.txtcl.AddItem "DLV020"

Me.txtel.AddItem "Vivienda"
Me.txtel.AddItem "Negocio"
Me.txtel.AddItem "Edificio multinivel"
Me.txtel.AddItem "Universidad"
Me.txtel.AddItem "Escuela"
Me.txtel.AddItem "Otro"

Me.txtvl.AddItem "Sotano"
Me.txtvl.AddItem "Primer piso"
Me.txtvl.AddItem "Segundo piso"
Me.txtvl.AddItem "Otro"

Me.txtcul.AddItem "Habitación"
Me.txtcul.AddItem "Sala"
Me.txtcul.AddItem "Oficina"
Me.txtcul.AddItem "Salón de clases"
Me.txtcul.AddItem "Otro"

Me.txthul.AddItem "Si"
Me.txthul.AddItem "No"

End Sub

```

Figura A.19: Programación en VBA de la hoja de datos para muestreo de radón en viviendas o edificios (Continuación).

```

Private Sub CommandButton1_Click()
last = ActiveSheet.Cells(Rows.Count, "A").End(xlUp).Row + 1
Range("A" & last).EntireRow.Insert

Range("A" & last).Value = txtfecha1.Value
Range("B" & last).Value = txthora1.Value
Range("C" & last).Value = txtfecha2.Value
Range("D" & last).Value = txthora2.Value
Range("E" & last).Value = txtnombrep.Value
Range("F" & last).Value = txtcodigod.Value
Range("G" & last).Value = txtepocal.Value
Range("H" & last).Value = txtestudio.Value
Range("I" & last).Value = txtcuadro.Value
Range("J" & last).Value = txtmasa.Value
Range("K" & last).Value = txtbox.Value

Me.txtfecha1.Value = ""
Me.txthora1.Value = ""
Me.txtfecha2.Value = ""
Me.txthora2.Value = ""
Me.txtnombrep.Value = ""
Me.txtcodigod.Value = ""
Me.txtepocal.Value = ""
Me.txtmasa.Value = ""
Me.txtestudio.Value = ""
Me.txtcuadro.Value = ""
Me.txtbox.Value = ""

End Sub

```

```

Private Sub CommandButton2_Click()
Me.txtfecha1.Value = ""
Me.txthora1.Value = ""
Me.txtfecha2.Value = ""
Me.txthora2.Value = ""
Me.txtnombrep.Value = ""
Me.txtcodigod.Value = ""
Me.txtepocal.Value = ""
Me.txtmasa.Value = ""
Me.txtestudio.Value = ""
Me.txtcuadro.Value = ""
Me.txtbox.Value = ""

End Sub

```

Figura A.20: Programación en VBA de la hoja de datos para muestreo de radón en estudios ambientales

```

Private Sub UserForm_Initialize()

txttepocal.AddItem "Verano"
txttepocal.AddItem "Invierno"

txttestudio.AddItem "Cuevas turisticas"
txttestudio.AddItem "Campos geotermicos"
txttestudio.AddItem "Balnearios"
txttestudio.AddItem "Establecimientos termales"

txtcodigod.AddItem "DEA001"
txtcodigod.AddItem "DEA002"
txtcodigod.AddItem "DEA003"
txtcodigod.AddItem "DEA004"
txtcodigod.AddItem "DEA005"
txtcodigod.AddItem "DEA006"
txtcodigod.AddItem "DEA007"
txtcodigod.AddItem "DEA008"
txtcodigod.AddItem "DEA009"
txtcodigod.AddItem "DEA010"
txtcodigod.AddItem "DEA011"
txtcodigod.AddItem "DEA012"
txtcodigod.AddItem "DEA013"
txtcodigod.AddItem "DEA014"
txtcodigod.AddItem "DEA015"
txtcodigod.AddItem "DEA016"
txtcodigod.AddItem "DEA017"
txtcodigod.AddItem "DEA018"
txtcodigod.AddItem "DEA019"
txtcodigod.AddItem "DEA020"

End Sub

```

Figura A.20: Programación en VBA de la hoja de datos para muestreo de radón en estudios ambientales (Continuación).

```

Private Sub CommandButton1_Click()

txt36.Text = Val(Exp((-0.693 * ((txt32.Value / 2) + txt34.Value)) / 330324.48))
txt37.Text = Val(txt31.Value / (txt32.Value * txt33.Value * txt35.Value * txt36.Text))

End Sub

Private Sub CommandButton2_Click()
last30 = ActiveSheet.Cells(Rows.Count, "A").End(xlUp).Row + 1

Range("A" & last30).EntireRow.Insert

Range("A" & last30).Value = txtn.Value
Range("B" & last30).Value = txt30.Value
Range("C" & last30).Value = txt31.Value
Range("D" & last30).Value = txt37.Text

End Sub

Private Sub CommandButton3_Click()
txtn.Value = ""
txt30.Value = ""
txt31.Value = ""
txt32.Value = ""
txt33.Value = ""
txt34.Value = ""
txt35.Value = ""
txt36.Value = ""
txt37.Value = ""

End Sub

```

```

Private Sub UserForm_Initialize()
txtn.AddItem "Vivienda"
txtn.AddItem "Lugares de trabajo"
End Sub

```

Figura A.21: Programación en VBA para calcular la concentración de radón adsorbida en carbón activado durante muestreo.

ANEXO 6. EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL (PPE) UTILIZADO POR EL PERSONAL QUE REALIZA LA PREPARACIÓN Y MANIPULACIÓN DE LAS FUENTES EMANADORAS DE GAS RADÓN, ASÍ COMO TAMBIÉN EL MUESTREO PERIÓDICO DE GAS RADÓN.

1. Máscara de aire con filtro para partículas: ayuda a reducir la inhalación del gas radón que se encuentra en las partículas de polvo.



Figura A.22: Máscara con filtro de partículas. Extraído de «BEXTOK». Recuperado de <https://blog.bextok.com>.

2. Bata de laboratorio manga larga.



Figura A.23: Bata blanca de laboratorio. Extraído de «VESTUARIO LABORAL MARTÍN». Recuperado de <http://laboralmartin.com>.

3. Gafas de plástico (para emisores alfa de baja energía).



Figura A.24: Gafas protectoras. Extraído de «AMAZON». Recuperado de <https://www.amazon.es>.

4. Guantes de látex.



Figura A.25: Guantes de látex desechables. Extraído de «TRUPER». Recuperado de <https://www.truper.com>.

ANEXO 7. MANUAL DE USO DE PROGRAMA KEMRADON-CIAN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y APLICACIONES
NUCLEARES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y
ARQUITECTURA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR



PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE
CONCENTRACIONES DE GAS RADÓN (Rn-222), EN
RECINTOS
CERRADOS Y ESTUDIOS AMBIENTALES

PRESENTADO POR:
MAINOR STANLEY CORDOVA VÁSQUEZ
MOISÉS ELÍAS GÓMEZ MIGUEL
KAYLA REYES RIVERA

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL CARBÓN ACTIVADO

DENSIDAD APARENTE Y CONCENTRACIÓN INICIAL DE RADIO EN
TIERRA

CALIBRACIÓN DE METODOLOGÍA

Determinación de la humedad

Determinación del contenido de cenizas

Determinación de la densidad aparente





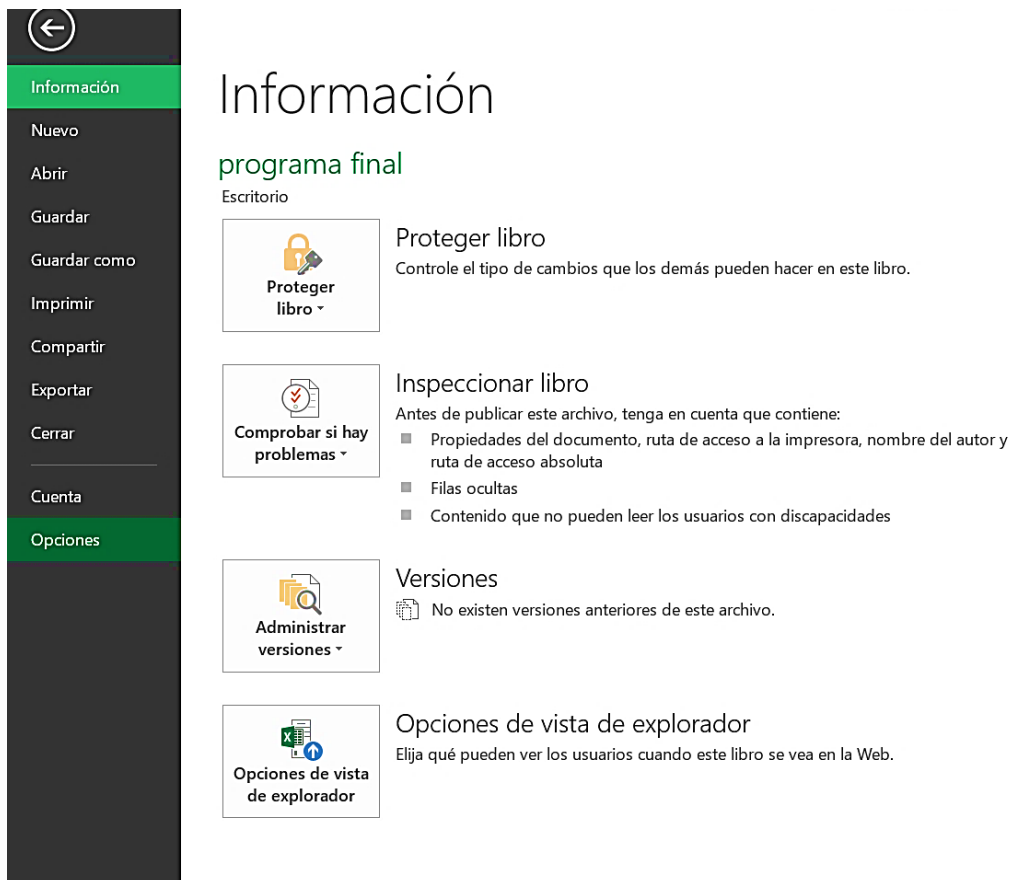
INDICE

1.	Habilitar ficha programador o desarrollador.	2
2.	Habilitar todas la macros	4
3.	Navegación por la pantalla de inicio	5
4.	Plantilla determinación de la humedad	6
5.	Plantilla de determinación del contenido de cenizas	10
6.	Plantilla para determinar la densidad aparente seca	12
7.	Plantilla de densidad aparente y concentración de radio en tierra	13
8.	Plantilla de calibración de la metodología.	15
9.	Plantilla cálculos de calibración	18
10.	Plantilla gráficos calibración	36
11.	Plantilla muestreo edificios o viviendas	40
12.	Plantilla muestreo estudios ambientales	41
13.	Plantilla cálculos muestreo	43
14.	Plantilla informe final	44

1. Habilitar ficha programador o desarrollador.

Para que las macros creadas se ejecuten en la plantilla de Excel es necesario habilitar la pestaña Programador o Desarrollador (según sea la versión de Excel) dentro de la cinta de opciones. Para mostrar esta pestaña se siguen los siguientes pasos.

1. Hacer clic en la pestaña archivo y elegir la sección de opciones, donde se mostrará el cuadro de diálogo Opciones de Excel donde se deberá seleccionar la opción Personalizar cinta de opciones.



Información

programa final

Escritorio

Proteger libro
Controle el tipo de cambios que los demás pueden hacer en este libro.

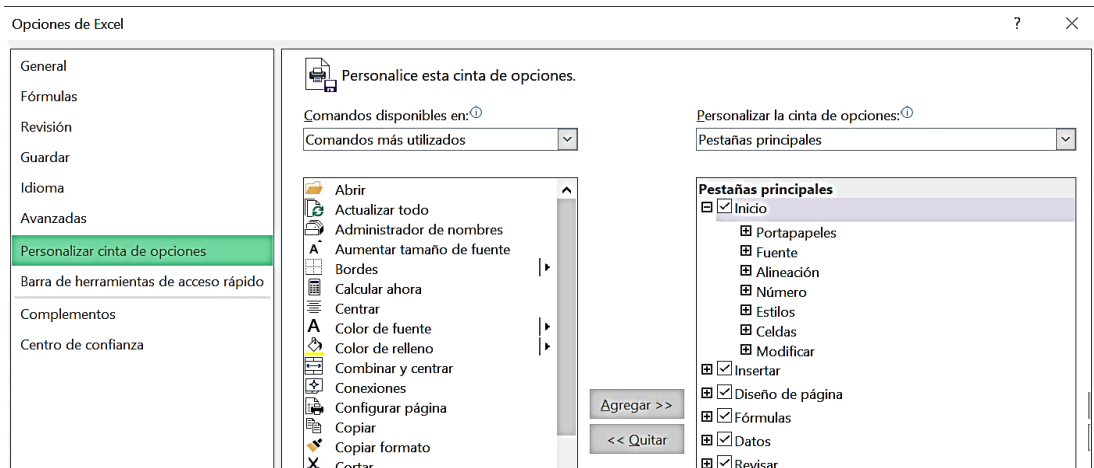
Inspeccionar libro
Antes de publicar este archivo, tenga en cuenta que contiene:

- Propiedades del documento, ruta de acceso a la impresora, nombre del autor y ruta de acceso absoluta
- Filas ocultas
- Contenido que no pueden leer los usuarios con discapacidades

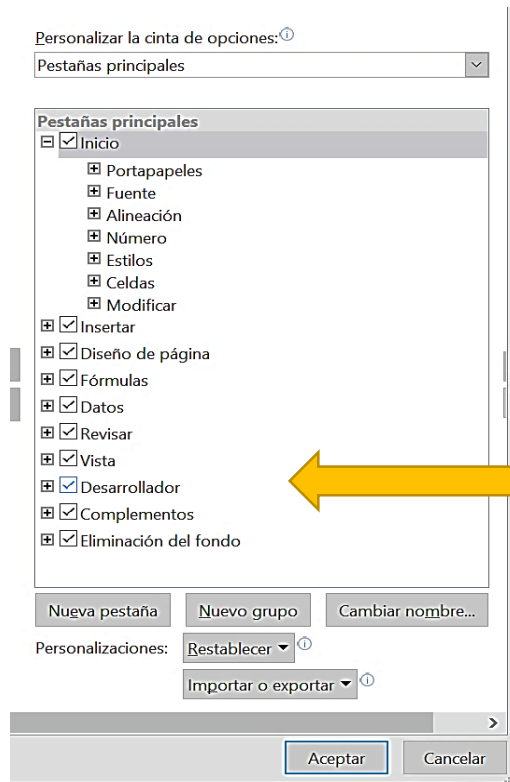
Versiones
No existen versiones anteriores de este archivo.

Administrar versiones

Opciones de vista de explorador
Elija qué pueden ver los usuarios cuando este libro se vea en la Web.



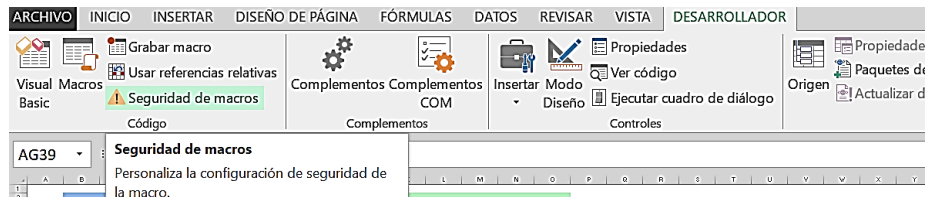
- Después en el panel que se ubica a la derecha del cuadro de dialogo se debe seleccionar la pestaña programador o desarrollador y finalmente se debe hacer clic en aceptar.



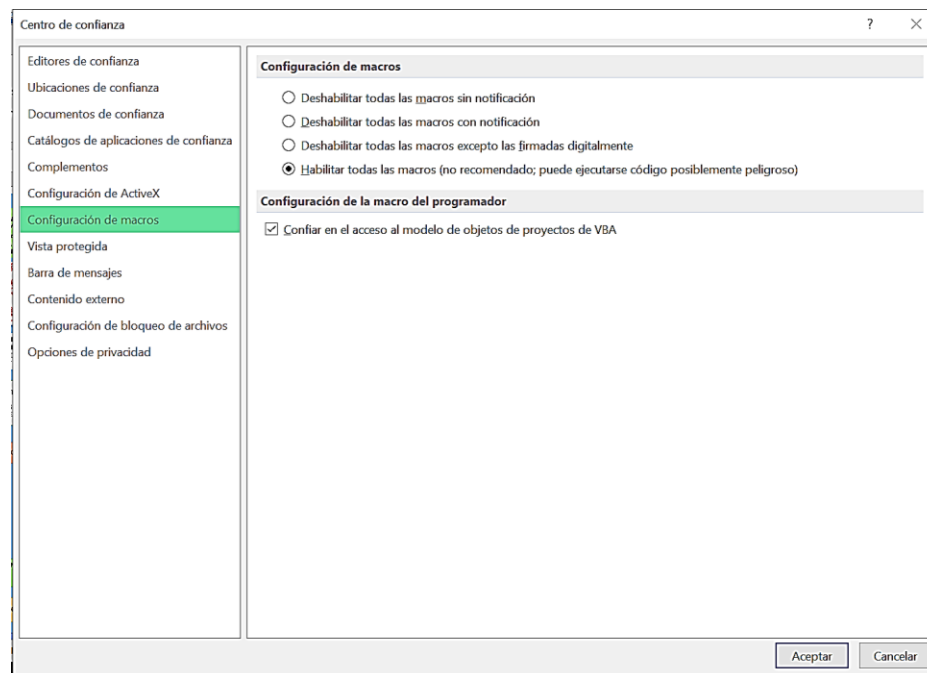
2. Habilitar todas la macros

Al habilitar todas las macros se asegura que nuestro programa corra de manera eficiente, por lo tanto para este procedimiento se siguen los siguientes pasos:

1. En la pestaña programador o desarrollador se hace clic en la sección de seguridad de macros.



2. Se abre el cuadro de dialogo siguiente y se debe seleccionar la opción de Configuración de macros, por último se deben marcar las opciones Habilitar todas las macros y Confiar en el acceso al modelo de objetos de proyectos.





3. Navegación por la pantalla de inicio

Para navegar por las distintas secciones del programa únicamente se debe hacer clic a la pestaña de interés, con esto se logra que se cree un hipervínculo que direcciona a la plantilla donde se encuentran programadas las hojas de datos o cálculos de la metodología.



Cuando se ubica en la plantilla, pero se quiere volver a la pantalla de inicio para dirigirse a una plantilla diferente, se debe hacer clic sobre el botón siguiente, lo que hará que se regrese al inicio del programa.



Este botón está colocado en cada plantilla y realiza en cada una la misma función.

4. Plantilla determinación de la humedad

Para ingresar los datos relacionados al cálculo del porcentaje de humedad se debe hacer clic sobre el botón ingresar datos del cuadro de botones de la esquina superior izquierda.



Al realizar esta acción se abrirá el siguiente formulario donde se debe ingresar, el tipo de carbón activado, los datos B, C y D de manera ordenada, una vez ingresados los datos se debe hacer clic al botón Calcular con lo que se mostrara el valor del porcentaje de humedad del carbón activado.

Determinación de la humedad

Tipo de carbón activado	Origen mineral	
B: Peso de la capsula vacía (g)	65	
C: Peso de la capsula más muestra inicial (g)	69	
D: Peso de la capsula más muestra seca (g)	68.75	
Porcentaje de humedad (%H)	6.25	

Calcular

Agregar Limpiar

Para guardar el registro y cálculo del porcentaje de humedad se debe hacer clic al botón Agregar ubicado en la esquina inferior izquierda; y si se quiere agregar otro registro de datos primero se debe limpiar la pantalla del formulario con el botón limpiar.



Cada registro se ira guardando de manera descendente en la tabla creada para dicho propósito.



La determinación de la humedad se hace utilizando la ecuación propuesta por la norma ASTM 99, descrita a continuación:

$$\%H = \frac{C - D}{C - B} \cdot 100$$

donde:

B = peso de la cápsula de porcelana vacía (g)

C = peso de la capsula más muestra inicial (g)

D = peso de la cápsula más muestra seca (g)

DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD			
Tipo de carbón activado	Peso de la capsula vacía (g)	Peso de la capsula más muestra inicial (g)	Peso de la capsula más muestra seca (g)
Origen mineral	65	69	68.75

En dado caso se haya registrado de manera errónea algún dato y se quiera volver a ingresar todos los datos, primero se debe borrar el registro de manera permanente, para ello se debe colocar en la celda donde se haya ingresado el tipo de carbón activado y se debe hacer clic al botón de Limpiar registro de humedad, es importante que se coloque en la celda correcta ya que esta acción se ha programado con referencias a la celda activa y solo funciona cuando se selecciona la celda correcta.



La determinación de la humedad se hace utilizando la ecuación propuesta por la norma ASTM 99, descrita a continuación:

donde:

B = peso de la cápsula de porcelana vacía (g)

C = peso de la capsula más muestra inicial (g)

D = peso de la cápsula más muestra seca (g)

Tipo de carbón activado	Peso de la capsula vacía (g)
Origen mineral	65

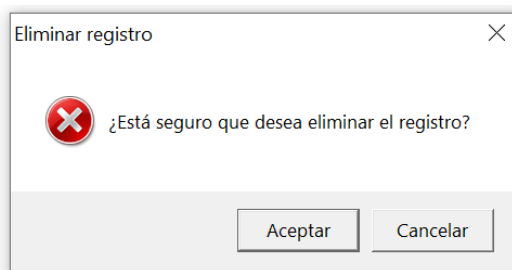
Para determinar si el valor obtenido está dentro del rango óptimo según la tabla 4.2, se debe colocar en la celda que corresponde a la columna Alerta.

Peso de la capsula más muestra seca (g)	Porcentaje de humedad (%H)	Alerta
68.75	6.25	Está dentro del rango óptimo

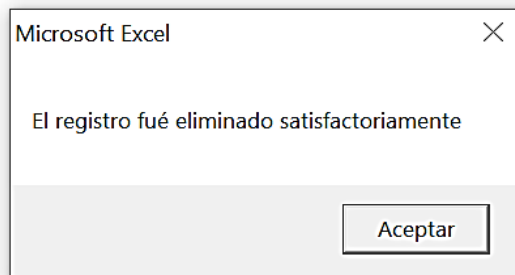
Posteriormente hacer clic en el botón siguiente

Determinar si el valor esta dentro del rango óptimo de porcentaje de humedad (revisar Tabla 4.2 Trabajo de Graduación Radón en Aire)

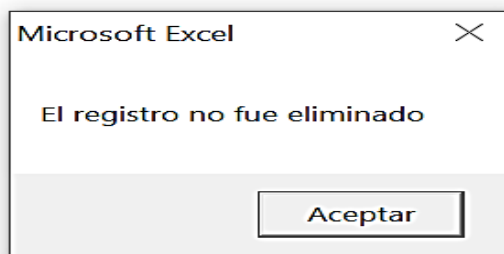
Antes de realizar la acción de borrar el registro el programa muestra un mensaje de advertencia en donde pregunta si se está seguro que se desea eliminar el registro.



En caso afirmativo la macro eliminara el registro y mostrará el siguiente mensaje.



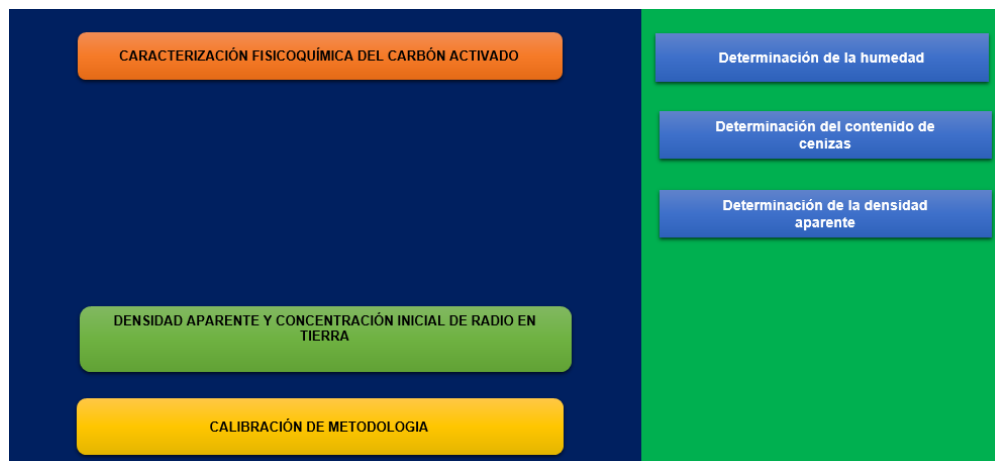
En el caso que se seleccione la opción cancelar se mostrará el siguiente mensaje.



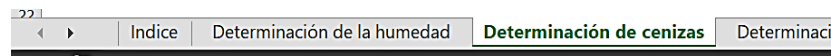
5. Plantilla de determinación del contenido de cenizas

Para dirigirse a la plantilla de determinación del contenido de cenizas se tiene dos opciones:

1. Regresar a la pantalla de inicio y hacer clic en el botón Determinación del contenido de cenizas.



2. Desplazarse en la barra de navegación de Excel y colocarse en la hoja de Determinación de cenizas.



Colocados en la plantilla de determinación del contenido de cenizas, hacer clic en el botón ingresar datos, acción que abrirá el siguiente formulario.



Derterminación del contenido de cenizas

Tipo de carbón activado Origen mineral

B: Peso del crisol vacío (g) 4.53


C: Peso del crisol más muestra inicial 8.53

D: Peso del crisol más muestra 5.1

%Cenizas totales 14.25

Calcular

Guardar Limpicar



Llenar de forma secuencial cada valor que requiere el cálculo del contenido de cenizas (B, C y D), posteriormente hacer clic en el botón de comando calcular que mostrará el valor en porcentaje del contenido de cenizas de la muestra de carbón activado, por ultimo hacer clic en el botón guardar lo cual hará que el registro quede guardado en la tabla de registro.



La determinación del contenido de cenizas se hace utilizando la ASTM D2866-94, descrita a continuación:

$$\%Cenizas\ totales = \frac{D - B}{C - B} \cdot 10$$

donde:
 B = peso del crisol vacío (g)
 C = peso del crisol más muestra inicial (g)
 D = peso del crisol más muestra incinerada (g)

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO		
Tipo de carbón activado	Peso del crisol vacío (g)	Peso del crisol más muestra inicial (g)
Origen mineral	4.53	8.53

Nota: Para determinar si el valor obtenido está dentro del rango óptimo y para eliminar un registro erróneo se siguen los mismos pasos explicados en la plantilla de determinación de humedad.



6. Plantilla para determinar la densidad aparente seca

En esta plantilla se determinan dos tipos de densidades: la densidad aparente recibida y la densidad aparente seca.

✓ Densidad aparente recibida

Hacer clic en el botón agregar datos del cuadro de comandos. Se abrirá el siguiente formulario.

Densidad aparente recibida

mc: Masa de carbón activado (g)	120
Vc: Volumen de carbón (mL)	250
Dar: Densidad aparente recibida (g/mL)	0.48

Calcular

Guardar Limpiar

Llenar datos de manera descendente y ordenada (mc y Vc), a continuación hacer clic en el botón calcular y posteriormente hacer clic en el botón guardar. Como resultado de las acciones anteriores se obtiene el valor de la densidad aparente recibida, pero aún falta calcular la densidad aparente seca que es la variable de interés, para ello colocarse en la celda donde debe ir el valor de la densidad aparente seca, luego ir al botón Calcular densidad aparente seca lo cual hará de manera automática el cálculo, tomando como referencia el porcentaje de humedad calculado en la plantilla Determinación de la humedad.



Ingresar datos

Calcular densidad aparente seca

Limpiar datos de densidad aparente

El cálculo de la densidad aparente recibida se determina para una muestra granular de carbón activado, mediante la medición del volumen empaquetado y determinando la masa del volumen conocido, haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad aparente recibida } \left(\frac{\text{g}}{\text{mL}}\right) = \frac{m_c}{V_c}$$

donde:
 m_c = masa de carbón activado (g)
 V_c = volumen de carbón (mL)

Obtenida la densidad aparente recibida se procede al cálculo de la densidad aparente recibida en seco de la siguiente manera:

$$D_a = D_{ar} \left(1 - \frac{\%H}{100}\right)$$

donde:
 D_a = densidad aparente seca (g/mL)
 D_{ar} = densidad aparente recibida (g/mL)

DETERMINACIÓN DE DENSIDAD APARENTE SECA			
Masa de carbón activado (g)	Volumen de carbón (mL)	Densidad aparente recibida (g/mL)	Densidad aparente seca (g/mL)
120	250	0.48	0.45

Nota: Para eliminar el registro se siguen los mismos pasos explicados en la plantilla de determinación de humedad, solo que en este caso se debe colocar en la celda donde está el valor de la Masa de carbón activado, de la misma manera se sigue el procedimiento para determinar si el valor obtenido está dentro del rango óptimo explicado en la plantilla determinación de la humedad.

7. Plantilla de densidad aparente y concentración de radio en tierra

Si la fuente de exhalación de radón es tierra preparada con solución de radio, se debe caracterizar la fuente calculando dos parámetros, la densidad aparente de tierra y la concentración inicial de radio en tierra, para esto Ir al botón ingresar datos y llenar el formulario de la manera siguiente:

Densidad aparente de tierra

1. Llenar valores de peso de tierra y volumen de cilindro

2. Hacer clic en el botón calcular

Concentración inicial de radio de tierra

1. Llenar valores de volumen de solución de radio, concentración de actividad, cantidad de tierra emanadora, concentración inicial de radio.
2. Hacer clic en el botón calcular
3. Llenar el campo de concentración final de radio en tierra si se cuenta con el dato.

densidad aparente y concentración de radio en tierra



The screenshot shows the KEMRADÓN software interface. At the top left is the KEMRADÓN logo. The interface is divided into two main sections: "Densidad aparente de tierra" (Apparent soil density) and "Concentración inicial de radio en tierra" (Initial radioactivity concentration in soil).

Densidad aparente de tierra

- Inputs: "Peso de tierra que cabe en el cilindro (g)", "Volumen del cilindro (mL) (recomendado por norma ASTM D2854-96)", "Densidad aparente de tierra (g/mL)".
- Image: A 3D rendering of a metal cylinder.
- Button: "Calcular".

Concentración inicial de radio en tierra

- Inputs: "Volumen de solución de radio (mL)", "Concentración de actividad de solución de solución de radio (Bq/mL)", "Cantidad de tierra emanadora (g)", "Concentración inicial de radio en tierra (Bq/g)", "Concentración final de radio en tierra (Bq/g)".
- Image: A photograph of dark soil.
- Buttons: "Calcular", "Agregar datos", "Limpiar datos".

4. Hacer clic en agregar datos
5. Para eliminar el registro se siguen los mismos pasos explicados en la plantilla de determinación de humedad, solo que en este caso se debe colocar en la celda de peso de tierra que cabe en el cilindro.




8. Plantilla de calibración de la metodología.

En esta plantilla se deben ingresar los datos generales de los 42 dispositivos de medición, ordenados según el código de identificación, siguiendo los siguientes pasos.

1. Hacer clic en el botón ingresar datos, ubicado en la parte superior izquierda de la hoja de Excel.
2. Llenar el formulario de ingreso por cada dispositivo, de la siguiente forma:
3. La fecha de inicio de calibración solo se ingresa para el primer dispositivo, por otro lado la fecha de finalización solo se ingresa en el último dispositivo.



Ingresar datos de calibración

Fecha de inicio de la calibración (solo aplica en el ingreso del primer dispositivo)	<input type="text" value="21/10/2020"/>		
Fecha de finalización de la calibración (solo aplica en el ingreso del ultimo dispositivo)	<input type="text"/>		
Temperatura de trabajo (° C)	<input type="text" value="25"/>		
Humedad de trabajo (%H)	<input type="text" value="20"/>		
Fuente emanadora de radón	<input type="text" value="Roca"/>		
Código de dispositivo de muestreo	<input type="text" value="D1-AN1"/>		
Color de etiqueta	<input type="text" value="Anaranjado-primer dia de extracción"/>		
Dia de extracción	<input type="text" value="Primero"/>		
ts: (s) (periodo de exposición del vial)	<input type="text" value="21600"/>	td: (s) (tiempo transcurrido desde la finalización de la exposición y el inicio del conteo)	<input type="text" value="21600"/>
		tc: (s) (periodo de conteo)	<input type="text" value="3600"/>
		Conteo blanco (CPM)	<input type="text" value="41.19"/>
		Conteo del dispositivo (CPM)	<input type="text" value="628.34"/>
		pa: (g) (peso del dispositivo antes de la exposición)	<input type="text" value="4"/>
		pd: (g) (peso del dispositivo después de la exposición)	<input type="text" value="4"/>

4. Por cada ingreso se debe hacer clic en el botón agregar, luego para ingresar los datos del dispositivo siguiente se tienen dos opciones:
 - ✓ Limpiar todo el registro haciendo clic en el botón limpiar
 - ✓ Borrar de manera manual los campos que son diferentes para el nuevo dispositivo y dejar intactos los que son iguales para todos los dispositivos.
5. Terminado el ingreso de todos los dispositivos, los datos son almacenados en la tabla para tal propósito.

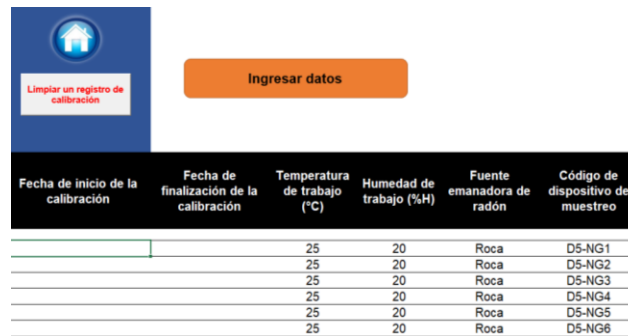
MANUAL DE USO DE PROGRAMA
ELABORADO EN MICROSOFT EXCEL



Fecha de inicio de la calibración	Temperatura de trabajo (°C)	Humedad de trabajo (%H)	Fuente emanadora de radón	Código de dispositivo de muestreo	Color de etiqueta de muestreo	ts (s) (periodo de exposición del dispositivo)	td (s) (tiempo transcurrido desde la finalización de la exposición y el inicio del conteo)	tc (s) (periodo de conteo)	Conteo blanco (CPM)	Conteo del dispositivo (CPM)	pa (g) (peso del dispositivo antes de la exposición)	pd (g) (peso del dispositivo después de la exposición)
21/10/2020	25	20	Roca	D1-AN1	Anaranjado-primer día de extracción	21600	21600	3600	41.19	628.34	4	4
	25	20	Roca	D1-AN2	Anaranjado-primer día de extracción	21660	21600	3600	41.19	629.99	4	4.001
	25	20	Roca	D1-AN3	Anaranjado-primer día de extracción	21720	21600	3600	41.19	631.63	4	4.001
	25	20	Roca	D1-AN4	Anaranjado-primer día de extracción	86400	21600	3600	41.19	2405.75	4	4.002
	25	20	Roca	D1-AN5	Anaranjado-primer día de extracción	86460	21600	3600	41.19	2407.4	4	4.002
	25	20	Roca	D1-AN6	Anaranjado-primer día de extracción	86520	21600	3600	41.19	2409.04	4	4.002
	25	20	Roca	D2-AZ1	Azul-segundo día de extracción	108000	21600	3600	41.19	2998.22	4	4.003
	25	20	Roca	D2-AZ2	Azul-segundo día de extracción	108060	21600	3600	41.19	2999.87	4	4.003
	25	20	Roca	D2-AZ3	Azul-segundo día de extracción	108120	21600	3600	41.19	3001.51	4	4.003
	25	20	Roca	D2-AZ4	Azul-segundo día de extracción	172800	21600	3600	41.19	4775.63	4	4.004
	25	20	Roca	D2-AZ5	Azul-segundo día de extracción	172860	21600	3600	41.19	4777.28	4	4.004
	25	20	Roca	D2-AZ6	Azul-segundo día de extracción	172920	21600	3600	41.19	4778.92	4	4.004
	25	20	Roca	D3-VD1	Verde-tercer día de extracción	194400	21600	3600	41.19	5368.1	4	4.005
	25	20	Roca	D3-VD2	Verde-tercer día de extracción	194460	21600	3600	41.19	5369.75	4	4.005
	25	20	Roca	D3-VD3	Verde-tercer día de extracción	194520	21600	3600	41.19	5371.39	4	4.005
	25	20	Roca	D3-VD4	Verde-tercer día de extracción	259200	21600	3600	41.19	7145.51	4	4.006
	25	20	Roca	D3-VD5	Verde-tercer día de extracción	259260	21600	3600	41.19	7147.16	4	4.006
	25	20	Roca	D3-VD6	Verde-tercer día de extracción	259320	21600	3600	41.19	7148.8	4	4.006
	25	20	Roca	D4-AM1	Amarillo-cuarto día de extracción	280800	21600	3600	41.19	7737.98	4	4.007
	25	20	Roca	D4-AM2	Amarillo-cuarto día de extracción	280860	21600	3600	41.19	7739.63	4	4.007
	25	20	Roca	D4-AM3	Amarillo-cuarto día de extracción	280920	21600	3600	41.19	7741.27	4	4.007
	25	20	Roca	D4-AM4	Amarillo-cuarto día de extracción	345600	21600	3600	41.19	9515.39	4	4.008
	25	20	Roca	D4-AM5	Amarillo-cuarto día de extracción	345660	21600	3600	41.19	9517.04	4	4.008
	25	20	Roca	D4-AM6	Amarillo-cuarto día de extracción	345720	21600	3600	41.19	9518.68	4	4.008

Fecha de inicio de la calibración	Temperatura de trabajo (°C)	Humedad de trabajo (%H)	Fuente emanadora de radón	Código de dispositivo de muestreo	Color de etiqueta de muestreo	ts (s) (periodo de exposición del dispositivo)	td (s) (tiempo transcurrido desde la finalización de la exposición y el inicio del conteo)	tc (s) (periodo de conteo)	Conteo blanco (CPM)	Conteo del dispositivo (CPM)	pa (g) (peso del dispositivo antes de la exposición)	pd (g) (peso del dispositivo después de la exposición)
	25	20	Roca	D5-NG1	Negro-quinto día de extracción	367200	21600	3600	41.19	10107.86	4	4.009
	25	20	Roca	D5-NG2	Negro-quinto día de extracción	367260	21600	3600	41.19	10109.51	4	4.009
	25	20	Roca	D5-NG3	Negro-quinto día de extracción	367320	21600	3600	41.19	10111.15	4	4.009
	25	20	Roca	D5-NG4	Negro-quinto día de extracción	432000	21600	3600	41.19	11885.27	4	4.01
	25	20	Roca	D5-NG5	Negro-quinto día de extracción	432060	21600	3600	41.19	11886.92	4	4.01
	25	20	Roca	D5-NG6	Negro-quinto día de extracción	432120	21600	3600	41.19	11888.56	4	4.01
	25	20	Roca	D6-RJ1	Rojo-sexto día de extracción	453600	21600	3600	41.19	12477.74	4	4.011
	25	20	Roca	D6-RJ2	Rojo-sexto día de extracción	453660	21600	3600	41.19	12479.39	4	4.011
	25	20	Roca	D6-RJ3	Rojo-sexto día de extracción	453720	21600	3600	41.19	12481.03	4	4.011
	25	20	Roca	D6-RJ4	Rojo-sexto día de extracción	518400	21600	3600	41.19	14255.15	4	4.012
	25	20	Roca	D6-RJ5	Rojo-sexto día de extracción	518460	21600	3600	41.19	14256.8	4	4.012
	25	20	Roca	D6-RJ6	Rojo-sexto día de extracción	518520	21600	3600	41.19	14258.44	4	4.012
	25	20	Roca	D7-MR1	Morado-septimo día de extracción	540000	21600	3600	41.19	14847.62	4	4.013
	25	20	Roca	D7-MR2	Morado-septimo día de extracción	540060	21600	3600	41.19	14849.27	4	4.013
	25	20	Roca	D7-MR3	Morado-septimo día de extracción	540120	21600	3600	41.19	14850.91	4	4.013
	25	20	Roca	D7-MR4	Morado-septimo día de extracción	604800	21600	3600	41.19	16625.03	4	4.014
	25	20	Roca	D7-MR5	Morado-septimo día de extracción	604860	21600	3600	41.19	16626.68	4	4.014
	25	20	Roca	D7-MR6	Morado-septimo día de extracción	604920	21600	3600	41.19	16628.32	4	4.014

- Si se desea eliminar un registro se debe colocar en la celda de Fecha de inicio de calibración de la fila donde se encuentre el registro erróneo, y se debe hacer clic en el botón Limpiar registro de calibración.



Fecha de inicio de la calibración	Fecha de finalización de la calibración	Temperatura de trabajo (°C)	Humedad de trabajo (%H)	Fuente emanadora de radón	Código de dispositivo de muestreo
		25	20	Roca	D5-NG1
		25	20	Roca	D5-NG2
		25	20	Roca	D5-NG3
		25	20	Roca	D5-NG4
		25	20	Roca	D5-NG5
		25	20	Roca	D5-NG6

9. Plantilla cálculos de calibración

Completados los datos iniciales de los 42 dispositivos de muestreo en la plantilla de Calibración de la metodología, se procede a desarrollar cada uno de los cálculos de la manera siguiente:

1. Exportar datos de calibración

Al presionar el botón exportar datos de calibración, se llenan automáticamente los campos que se completaron en la hoja anterior y que son de utilidad en la nueva plantilla.

Exportar datos de calibración



Campos antes de presionar el botón de comando

Dia de exposición	Código de dispositivo de medición	ts (s) (periodo de exposición del dispositivo)	td (s) (tiempo transcurrido desde la finalizacion de la exposicion y el inicio del conteo)	tc (s) (periodo de conteo)	Conteo blanco (CPM)	Conteo del dispositivo (CPM)	pa (g) (peso del dispositivo antes de exposición)	pd (g) (peso del dispositivo después de exposición)	Δp
Primero									
Segundo									
Tercero									
Cuarto									
Quinto									
Sexto									
Septimo									



Campos llenos después de activar el comando exportar datos.

Día de exposición	Código de dispositivo de medición	ts (s) (periodo de exposición del dispositivo)	td (s) (tiempo transcurrido desde la finalización de la exposición y el inicio del conteo)	tc (s) (periodo de conteo)	Conteo blanco (CPM)	Conteo del dispositivo (CPM)	pa (g) (peso del dispositivo antes de exposición)	pd (g) (peso del dispositivo después de exposición)
Primero	D1-AN1	21600	21600	3600	41.19	628.34	4	4
	D1-AN2	21660	21600	3600	41.19	629.99	4	4.001
	D1-AN3	21720	21600	3600	41.19	631.63	4	4.001
	D1-AN4	86400	21600	3600	41.19	2405.75	4	4.002
	D1-AN5	86460	21600	3600	41.19	2407.4	4	4.002
	D1-AN6	86520	21600	3600	41.19	2409.04	4	4.002
Segundo	D2-AZ1	108000	21600	3600	41.19	2998.22	4	4.003
	D2-AZ2	108060	21600	3600	41.19	2999.87	4	4.003
	D2-AZ3	108120	21600	3600	41.19	3001.51	4	4.003
	D2-AZ4	172800	21600	3600	41.19	4775.63	4	4.004
	D2-AZ5	172860	21600	3600	41.19	4777.28	4	4.004
	D2-AZ6	172920	21600	3600	41.19	4778.92	4	4.004
Tercero	D3-VD1	194400	21600	3600	41.19	5368.1	4	4.005
	D3-VD2	194460	21600	3600	41.19	5369.75	4	4.005
	D3-VD3	194520	21600	3600	41.19	5371.39	4	4.005
	D3-VD4	259200	21600	3600	41.19	7145.51	4	4.006
	D3-VD5	259260	21600	3600	41.19	7147.16	4	4.006
	D3-VD6	259320	21600	3600	41.19	7148.8	4	4.006
Cuarto	D4-AM1	280800	21600	3600	41.19	7737.98	4	4.007
	D4-AM2	280860	21600	3600	41.19	7739.63	4	4.007
	D4-AM3	280920	21600	3600	41.19	7741.27	4	4.007
	D4-AM4	345600	21600	3600	41.19	9515.39	4	4.008
	D4-AM5	345660	21600	3600	41.19	9517.04	4	4.008
	D4-AM6	345720	21600	3600	41.19	9518.68	4	4.008
Quinto	D5-NG1	367200	21600	3600	41.19	10107.86	4	4.009
	D5-NG2	367260	21600	3600	41.19	10109.51	4	4.009
	D5-NG3	367320	21600	3600	41.19	10111.15	4	4.009
	D5-NG4	432000	21600	3600	41.19	11885.27	4	4.01
	D5-NG5	432060	21600	3600	41.19	11886.92	4	4.01
	D5-NG6	432120	21600	3600	41.19	11888.56	4	4.01
Sexto	D6-RJ1	453600	21600	3600	41.19	12477.74	4	4.011
	D6-RJ2	453660	21600	3600	41.19	12479.39	4	4.011
	D6-RJ3	453720	21600	3600	41.19	12481.03	4	4.011
	D6-RJ4	518400	21600	3600	41.19	14255.15	4	4.012
	D6-RJ5	518460	21600	3600	41.19	14256.8	4	4.012
	D6-RJ6	518520	21600	3600	41.19	14258.44	4	4.012
Séptimo	D7-MR1	540000	21600	3600	41.19	14847.62	4	4.013
	D7-MR2	540060	21600	3600	41.19	14849.27	4	4.013
	D7-MR3	540120	21600	3600	41.19	14850.91	4	4.013
	D7-MR4	604800	21600	3600	41.19	16625.03	4	4.014
	D7-MR5	604860	21600	3600	41.19	16626.68	4	4.014
	D7-MR6	604920	21600	3600	41.19	16628.32	4	4.014



2. Calcular promedios



Con este botón se calculan los promedios de t_s , t_d , t_c , conteo blanco, conteo de dispositivo y diferencia de peso del dispositivo.

Campos previos a la activación del comando.

Día de exposición	t_s (prom)	t_d (prom)	t_c (prom)	Conteo blanco (prom) (min)	Conteo blanco (prom) (s)	Conteo del dispositivo (prom) (min)	Conteo del dispositivo (CPS)	Δp	Δp (prom)	N (s^{-1}) (cuentas netas)
Primero										
Segundo										
Tercero										
Cuarto										
Quinto										
Sexto										
Septimo										



Campos posteriores a la activación del comando.

Día de exposición	ts (prom)	td (prom)	te (prom)	Conteo blanco (prom) (min)	Conteo blanco (prom) (s)	Conteo del dispositivo (prom) (min)	Conteo del dispositivo (CPS)	Δp	Δp (prom)	N (s ⁻¹) (cuentas netas)
Primero	21660	21600	3600	41.1900	0.6865	629.165	10.48608333	0	0.000666667	9.7996
	86460	21600	3600	41.1900	0.6865	2406.575	40.10958333	0.001		
Segundo	108060	21600	3600	41.1900	0.6865	2999.045	49.98408333	0.002	0.003	49.2976
	172860	21600	3600	41.1900	0.6865	4776.455	79.60758333	0.002		
Tercero	194460	21600	3600	41.1900	0.6865	5368.925	89.48208333	0.003	0.005	88.7956
	259260	21600	3600	41.1900	0.6865	7146.335	119.1055833	0.003		
Cuarto	280860	21600	3600	41.1900	0.6865	7738.805	128.9800833	0.004	0.006	118.4191
	345660	21600	3600	41.1900	0.6865	9516.215	158.6035833	0.004		
Quinto	367260	21600	3600	41.1900	0.6865	10108.685	168.4780833	0.005	0.007	128.2936
	432060	21600	3600	41.1900	0.6865	11886.095	198.1015833	0.005		
Sexto	453660	21600	3600	41.1900	0.6865	12478.565	207.9760833	0.007	0.008	157.9171
	518460	21600	3600	41.1900	0.6865	14255.975	237.5995833	0.007		
Septimo	540060	21600	3600	41.1900	0.6865	14948.445	247.4740833	0.008	0.009	167.7916
	604860	21600	3600	41.1900	0.6865	16625.855	277.0975833	0.008		
								0.009	0.01	197.4151
								0.009		
								0.01	0.011	207.2896
								0.01		
								0.011	0.012	236.9131
								0.011		
								0.012	0.013	246.7876
								0.012		
								0.013	0.014	276.4111
								0.013		
								0.014		
								0.014		



3. Calcular velocidad de exhalación superficial

Calcular velocidad de exhalación

El botón calcular velocidad de exhalación, calcula la velocidad de exhalación superficial de radón a partir de la siguiente ecuación propuesta por Spehr & Johnston (1983).

Fórmula para calcular la eficiencia de conteo del detector:

$$\epsilon \left(\frac{s}{Bq} \right) = \frac{\text{cps patrón} - \text{cps blanco}}{\text{Actividad patrón (Bq)}}$$

La velocidad de exhalación diaria superficial de radón se calcula a través de ecuación de Spehr & Johnston (1983), a partir de las cuentas netas obtenidas de la medición de radón en carbon activado:

$$E = \frac{N \cdot t_c \cdot \lambda^2 \cdot \exp(\lambda \cdot t_d)}{\epsilon \cdot a \cdot [1 - \exp(-\lambda \cdot t_s)] \cdot [1 - \exp(-\lambda \cdot t_c)]}$$

Donde

E (Bq/m²*s): velocidad de exhalación superficial

N (s⁻¹): cuentas netas (cuentas obtenidas durante el tiempo de conteo menos las cuentas del blanco)

t_c (s): periodo de conteo

λ (s⁻¹): constante de decaimiento del Rn²²²

t_d (s): tiempo transcurrido desde la finalización de la exposición y el inicio de conteo

ε (s⁻¹*Bq⁻¹): eficiencia de conteo del detector

A (m²): superficie de exhalación

t_s (s): periodo de exposición del dispositivo



La ecuación incluye el valor de la eficiencia de conteo del equipo de detección (equipo de centelleo líquido), para obtener ese valor se hace uso de la ecuación que se encuentra en el recuadro verde la cual es propuesta por Llerena (2006). Al mismo tiempo estas ecuaciones requieren de los siguientes parámetros:

CPS patrón, CPS blanco, actividad patrón (Bq), el ingreso de estos valores se hace de forma manual llenando cada campo de manera ordenada y en las unidades correspondientes

cps patrón	1.67
cps blanco	0.6865
Actividad patrón (Bq)	1

Posteriormente al llenado de las celdas anteriores aparecerá de manera automática del valor de la eficiencia del equipo de conteo, tal como se muestra en la figura siguiente.

ϵ ($s^{-1} \cdot Bq^{-1}$) (Eficiencia de conteo del detector)	0.9835
--	---------------

Los demás parámetros requeridos se ingresan de forma manual procurando colocar los valores en las unidades correspondientes llevando armonía entre unidades, algunos de estos parámetros son de utilidad en los siguientes cálculos por lo que se recomienda ingresarlos en esta etapa.



λ (s ⁻¹) [Constante de decaimiento del Rn ²²²]	2.0984E-06
tV2 (s)	330324.48
A (m ²) [Superficie de exhalación]	0.0016
Volumen del contenedor de acumulación (m ³)	0.01864

En las figuras siguientes se observan los rangos de celdas antes y después de realizada la acción del botón de comando.

Día de exposición	Velocidad de exhalación superficial (Bq/m ² ·s)
Primero	
Segundo	
Tercero	
Cuarto	
Quinto	
Sexto	
Septimo	

Día de exposición	Velocidad de exhalación superficial (Bq/m ² ·s)
Primero	0.308895088
	0.332786725
Segundo	0.340329069
	0.363341942
Tercero	0.371184434
	0.395282906
Cuarto	0.403510225
	0.428780258
Quinto	0.437399147
	0.463836929
Sexto	0.472841347
	0.500420501
Septimo	0.509799591
	0.538482999



4. Calcular concentración de radón en cámara

Calcular concentración

Presionando este botón se calcula la concentración de radón teórica en la cámara de calibración por medio de la ecuación recomendada por Fuente (2016), donde se desprecia el valor de la concentración inicial de radón en la cámara para un tiempo igual a cero.

Partiendo de la velocidad de exhalación E se puede calcular la concentración teórica en la cámara con la ecuación que plantea Fuente (2016), esta ecuación desprecia los efectos de ventilación en la cámara y la concentración inicial a un tiempo igual a 0.

$$C_{Rn} = (C_0)(e^{-\lambda(t_s)}) + \frac{EA}{VA}(1 - e^{-\lambda(t_s)})$$

Donde
 E ($Bq/m^2 \cdot s$): velocidad de exhalación superficial
 C_0 (Bq/m^3): concentración inicial de radón en la cámara
 A (m^2): superficie de exhalación
 V (m^3): volumen del contenedor de acumulación
 λ (s^{-1}): constante de desintegración de radón
 C_{Rn} (Bq/m^3): concentración en el acumulador
 t_s (s): tiempo de exposición



En las siguientes figuras se muestra las acciones antes y después de activado el botón calcular concentración.

Día de exposición	Velocidad de exhalación superficial (Bq/m ² * s)	Concentración en la cámara (Bq/m ³)	Concentración en la cámara (Bq/m ³)
Primero			
Segundo			
Tercero			
Cuarto			
Quinto			
Sexto			
Septimo			

Día de exposición	Velocidad de exhalación superficial (Bq/m ² * s)	Concentración en la cámara (Bq/m ³)	Concentración en la cámara (Bq/m ³)
Primero	0.308895088	561.4502458	561.4502
	0.332786725	2258.677647	2258.6776
Segundo	0.340329069	2824.420115	2824.4201
	0.363341942	4521.647516	4521.6475
Tercero	0.371184434	5087.389983	5087.3900
	0.395282906	6784.617385	6784.6174
Cuarto	0.403510225	7350.359852	7350.3599
	0.428780258	9047.587254	9047.5873
Quinto	0.437399147	9613.329721	9613.3297
	0.463836929	11310.55712	11310.5571
Sexto	0.472841347	11876.29959	11876.2996
	0.500420501	13573.52699	13573.5270
Septimo	0.509739531	14139.26946	14139.2695
	0.538482999	15836.49686	15836.4969



La acción muestra en formato condicional la velocidad de exhalación calculada en el botón anterior y la concentración calculada con este botón, el formato presenta en código de barras el incremento o la disminución de los parámetros.

5. Calcular factor de calibración

Calcular factor de calibración

Con este botón se calcula el factor de calibración por medio de la ecuación propuesta por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (1990).

Luego se calcula el CF (factor de calibración) con la ecuación propuesta por la EPA (1990):

$$CF = (N) / (t_s * \epsilon * C_{Rn} * D_F)$$

Donde:

CF (m³/s): factor de calibración

N (s⁻¹): cuentas netas

t_s (s): tiempo de exposición

ε (s⁻¹/Bq): eficiencia del detector

C_{Rn} (Bq/m³): concentración de radón durante periodo de exposición

D_F: factor de decaimiento

$$D_F = e^{-\frac{\ln(2) t}{t_{1/2}}}$$

t (s⁻¹): tiempo desde la mitad del periodo de exposición hasta el inicio de contaje

t_{1/2} (s⁻¹): la vida media del Rn-222



En las siguientes figuras se muestran las acciones antes y después de activado el botón calcular Factor de calibración.

Día de exposición	t(s)	DF	CF (factor de calibración)[m ³ /s]
Primero			
Segundo			
Tercero			
Cuarto			
Quinto			
Sexto			
Septimo			

Día de exposición	t(s)	DF	CF (factor de calibración)[m ³ /s]
Primero	32430.0000	0.934226746	8.77023E-07
	64830.0000	0.872834545	2.35166E-07
Segundo	75630.0000	0.853280465	1.92471E-07
	108030.0000	0.797207605	1.28782E-07
Tercero	118830.0000	0.779347793	1.17101E-07
	151230.0000	0.728133378	9.40103E-08
Cuarto	162030.0000	0.711821033	8.8769E-08
	194430.0000	0.665044102	7.72009E-08
Quinto	205230.0000	0.650145144	7.43255E-08
	237630.0000	0.607421211	6.7622E-08
Sexto	248430.0000	0.593813176	6.58782E-08
	280830.0000	0.554791067	6.16989E-08
Septimo	291630.0000	0.542362104	6.05886E-08
	324030.0000	0.506721074	5.79026E-08



6. Calcular coeficiente de adsorción de radón en carbón activado

Calcular coeficiente de adsorción

Con este botón se calcula el coeficiente de adsorción de radón en carbón activado de la siguiente manera.

Primero se debe colocar la concentración de radón leída en el equipo de medición continua de radón (equipo Corentium) en la columna correspondiente, dichas lecturas se harán según las horas de extracción de los dispositivos de muestreo, segundo se presiona el botón Calcular coeficiente de adsorción lo cual mostrará los valores del coeficiente de adsorción aplicando la ecuación propuesta por Canoba y López (2001).

Determinación de coeficiente de adsorción de radón en carbón activado mediante la ecuación recomendada por Canoba y López (2001).

$$k(t) = \frac{Q(t)}{C_a}$$

Donde:

$k(t)$ = constante de adsorción (m^3/g)

$Q(t)$ = actividad de Rn-222 adsorbida por unidad de masa de carbón (Bq/g)

C_a = concentración de Rn-222 en la cámara de referencia (Bq/m^3)



En las figuras siguientes se muestran los resultados antes y después de la acción del comando.

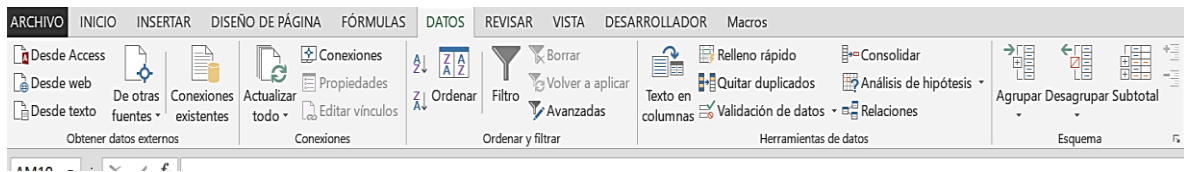
Día de exposición	Q(t) (Bq/g)	Ca (Bq/m ³)	K(t) (coeficiente de adsorción de radón en carbón activado) (m ³ /g)
Primero		564	0
		2262	0
Segundo		2826	0
		4523	0
Tercero		5089	0
		6786	0
Cuarto		7353	0
		9051	0
Quinto		9616	0
		11314	0
Sexto		11879	0
		13576	0
Septimo		14142	0
		15839	0

Día de exposición	Q(t) (Bq/g)	Ca (Bq/m ³)	K(t) (coeficiente de adsorción de radón en carbón activado) (m ³ /g)
Primero	0.001247667	564	2.21218E-06
	0.005019284	2262	2.21896E-06
Segundo	0.006276489	2826	2.22098E-06
	0.010048106	4523	2.22156E-06
Tercero	0.011305311	5089	2.22152E-06
	0.015076928	6786	2.22177E-06
Cuarto	0.016334133	7353	2.22142E-06
	0.020105749	9051	2.22138E-06
Quinto	0.021362955	9616	2.22161E-06
	0.025134571	11314	2.22155E-06
Sexto	0.026391777	11879	2.22172E-06
	0.030163393	13576	2.22182E-06
Septimo	0.031420599	14142	2.22179E-06
	0.035192215	15839	2.22187E-06

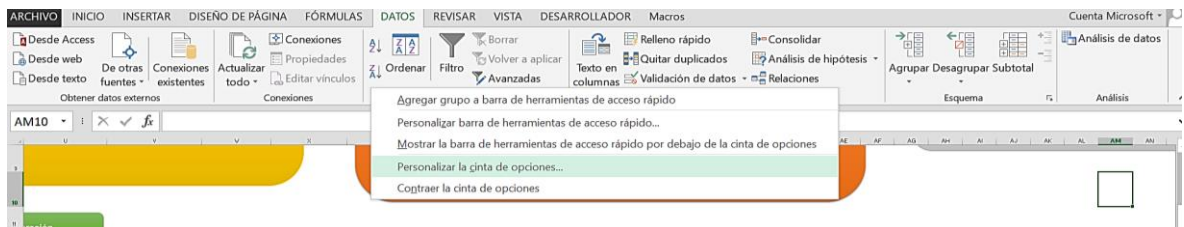
Es recomendable analizar mediante estadística descriptiva los valores del coeficiente de adsorción para poder observar la variabilidad a través del tiempo de tal parámetro. Para ello se sigue el siguiente procedimiento:

1. Activar la opción Análisis de datos

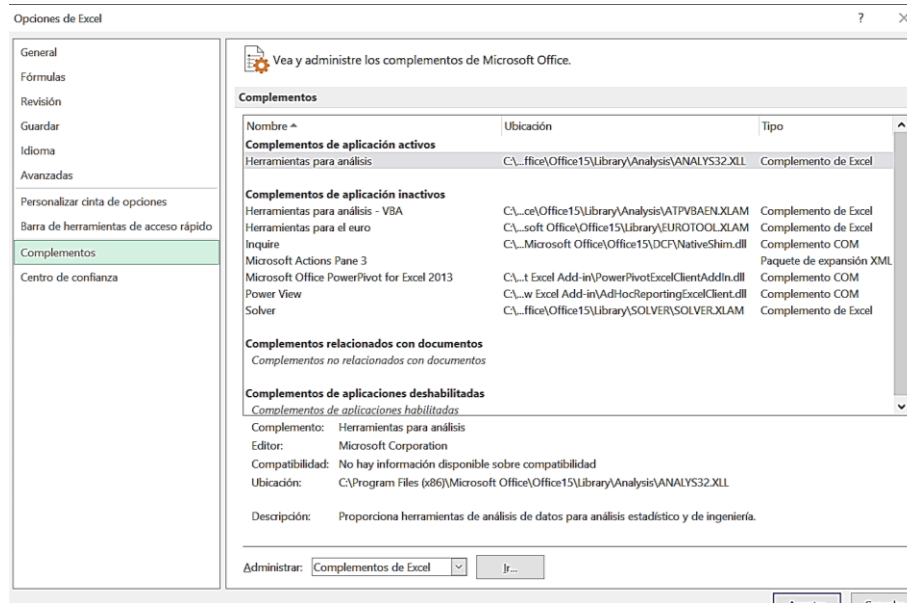
Hacer clic derecho sobre un espacio vacío de la pestaña datos.



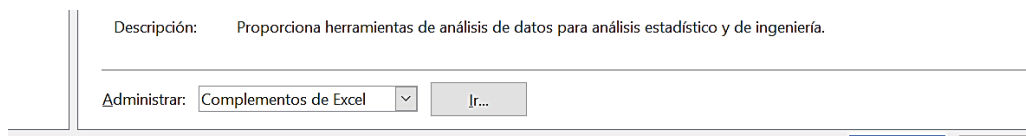
Hacer clic en personalizar cinta de opciones



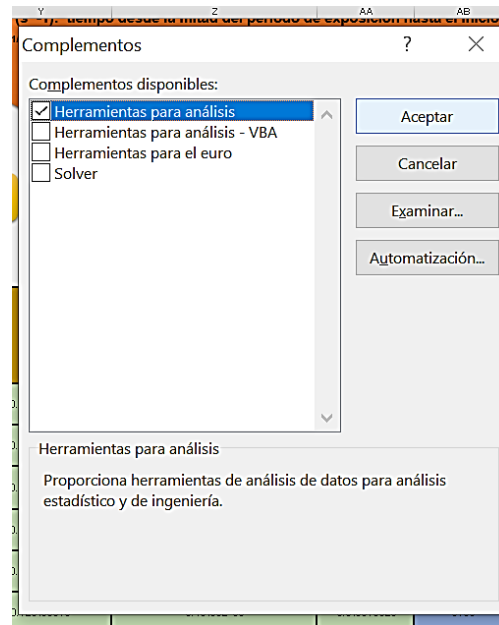
Se abre el siguiente cuadro con menús.



Selecciona la opción complemento y seguidamente colocarse en el cuadro complementos de Excel.



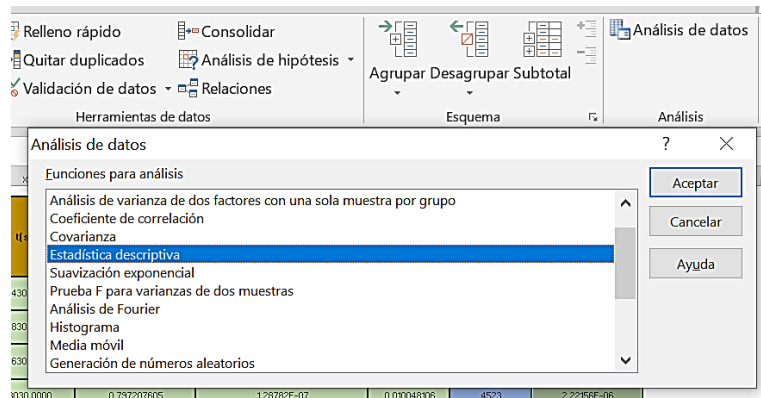
Presionar el botón Ir el cual desplegará el siguiente cuadro donde se debe seleccionar Análisis de datos.



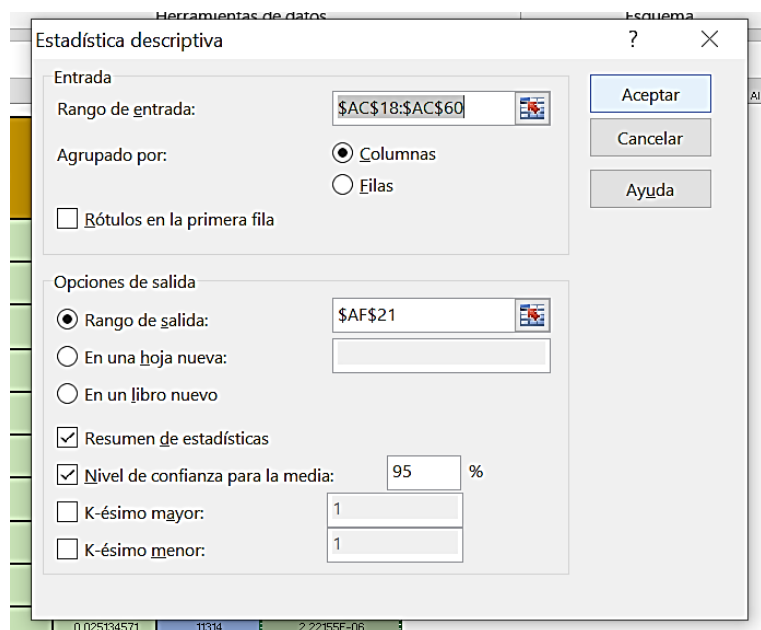
Finalmente clic en aceptar.

2. Parámetros de estadísticas descriptiva

Ir a la opción Análisis de datos y seleccionar dentro del cuadro de menús la opción Estadística descriptiva.



Clic en Aceptar.



Seleccionar el rango de entrada (Columna donde se encuentra el coeficiente de adsorción), seleccionar el rango de salida, seleccionar Resumen de estadísticas y seleccionar el Nivel de confianza. Por ultimo dar clic en aceptar. Finalizadas las acciones se presenta una tabla resumen con los principales parámetros estadísticos de los datos evaluados.



K(t) (coeficiente de adsorción de radón en carbón activado) (m ³ /g)	
Media	2.22072E-06
Error típico	6.86176E-10
Mediana	2.22155E-06
Moda	#N/A
Desviación estándar	2.56744E-09
Varianza de la muestra	6.59172E-18
Curtosis	11.24094564
Coefficiente de asimetría	-3.291272286
Rango	9.69512E-09
Mínimo	2.21218E-06
Máximo	2.22187E-06
Suma	3.10901E-05
Cuenta	14
Nivel de confianza(95.0%)	1.48239E-09

Para eliminar valores de la tabla se debe seleccionar el rango de valores y presionar la tecla Delete.

10. Plantilla gráficos calibración

Esta plantilla está creada para la elaboración de los siguientes gráficos:

- A. Gráfico Factor de calibración vs Diferencia de peso del dispositivo de muestreo.

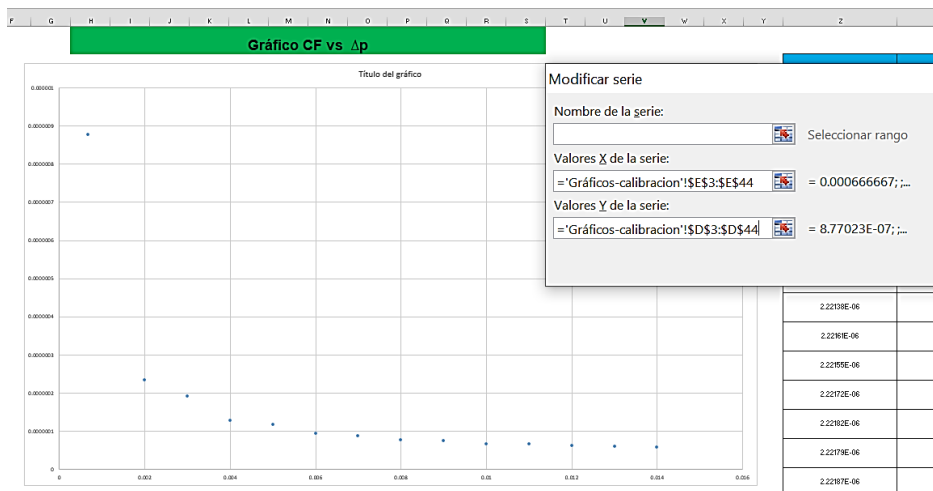
Para crear este grafico primero se deben exportar los datos de CF y Δp obtenidos en la plantilla de Cálculos de calibración, para ello hacer clic en el botón exportar datos de factor de calibración.

Exportar datos de
factor de calibración

Esta acción colocara los datos en la siguiente tabla.

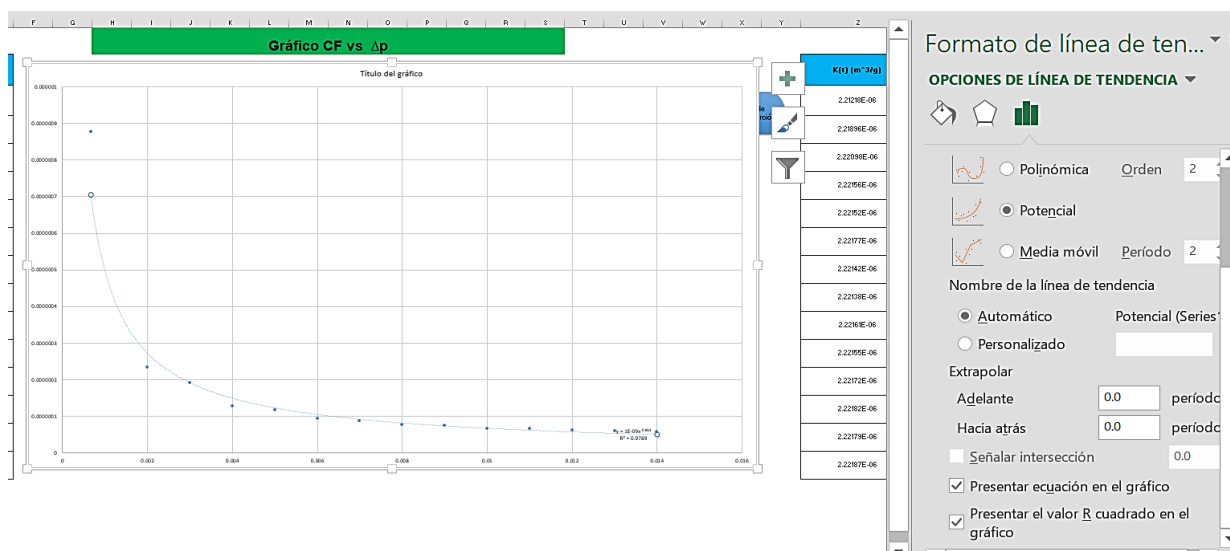
CF (factor de calibración)(m ³ /s)	Δp (g)
8.77023E-07	0.000666667
2.35166E-07	0.002
1.92471E-07	0.003
1.26782E-07	0.004
1.17101E-07	0.005
9.40103E-08	0.006
8.8769E-08	0.007
7.72009E-08	0.008
7.43255E-08	0.009
6.7622E-08	0.01
6.58782E-08	0.011
6.16989E-08	0.012
6.05886E-08	0.013
5.79026E-08	0.014

Posteriormente para elaborar el gráfico se debe Ir a la pestaña Insertar y seleccionar la opción Gráfico de dispersión, seleccionar la serie de datos, clic en aceptar, se formará una tendencia de los datos proyectados.

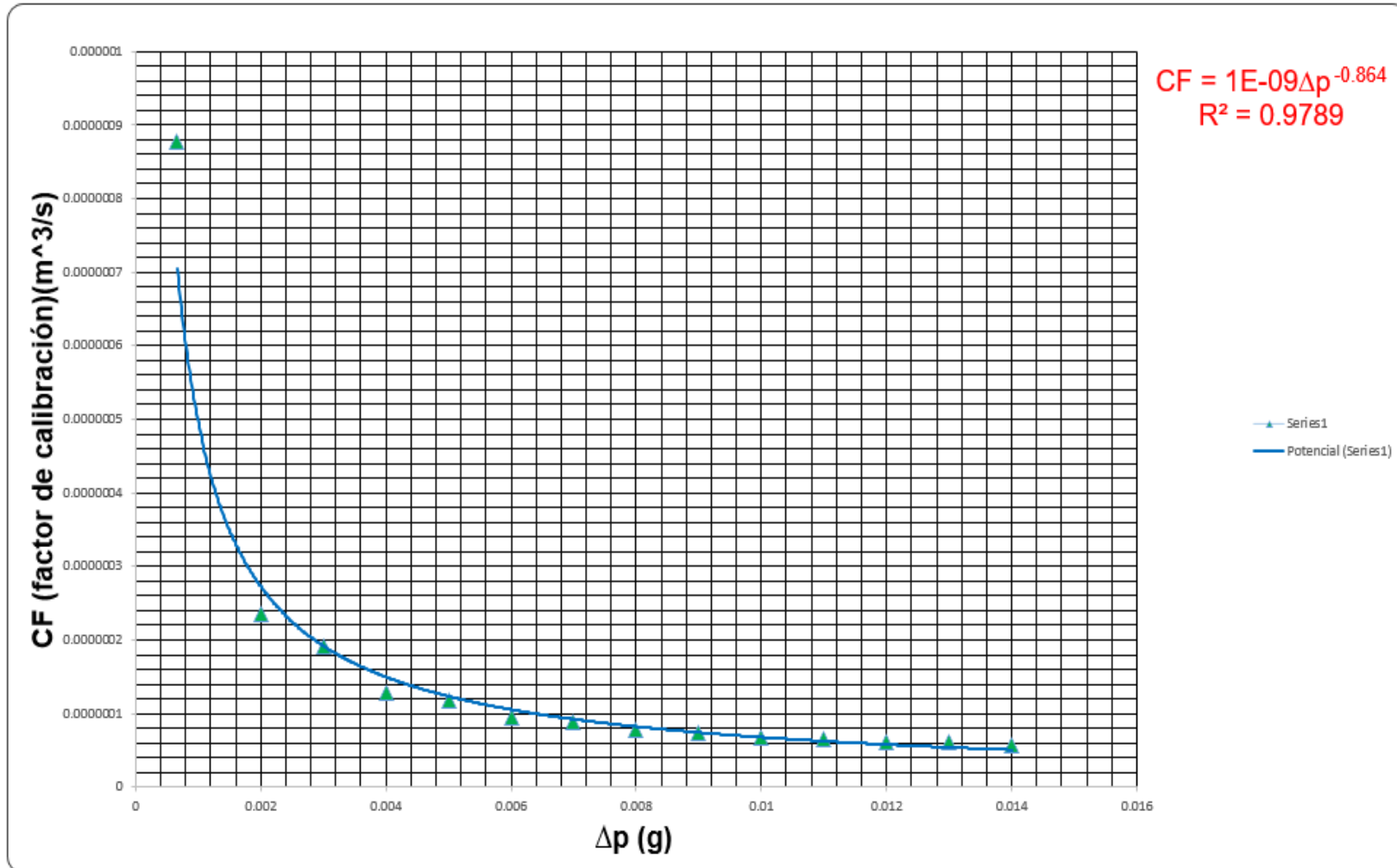


Para dibujar la línea de tendencia y obtener la ecuación que describa el comportamiento, se debe hacer clic derecho sobre un punto de la gráfica y seleccionar la opción Agregar línea de tendencia.

Se abrirá un cuadro de opciones donde se debe elegir la tendencia que mejor se aplique a la serie de datos, además se debe marcar la opción presentar ecuación en el gráfico y presentar el valor R cuadrado en el gráfico.



Para terminar se personaliza el gráfico agregando rótulos a los ejes y se eligen los colores del gráfico



A. Gráfico Coeficiente de adsorción vs tiempo de exposición.

Para crear este gráfico se siguen los mismos pasos del gráfico anterior.


11. Plantilla muestreo edificios o viviendas


En esta plantilla se guardan los datos concernientes a los dispositivos de medición de radón utilizados en muestreos en viviendas, el uso de esta plantilla es similar a las anteriores, se accede al formulario de registro haciendo clic en el botón ingresar datos.

Ingresar datos

Se abrirá el siguiente formulario donde deben ser completados todos los campos, algunos campos son listas desplegables donde se da la opción de elegir la opción correcta.

Muestreo lugares de trabajo o viviendas ×

Fecha de inicio de la medición	<input type="text"/>		
Fecha de finalización de la medición	<input type="text"/>		
Hora de inicio de la medición	<input type="text"/>	Hora de finalización de la medición	<input type="text"/>
Código de dispositivo de medición	<input type="text"/>	Nombre del muestreo	<input type="text"/>
Tipo de edificio donde se realizo la medición	<input type="text"/>	pa(g) (peso del dispositivo antes de la medición):	<input type="text"/>
Piso del edificio o vivienda donde se realizo la medición	<input type="text"/>	pd(g) (peso del dispositivo después de la medición):	<input type="text"/>
Cuarto donde se realizo la medición	<input type="text"/>		
Hubo ventilación de puertas y ventanas durante la medición	<input type="text"/>		
Observaciones	<input type="text"/>		



Finalizado el ingreso se debe hacer clic en el botón aceptar, si se desea ingresar otro registro, se puede realizar desde la misma ventana, limpiando solamente el entorno de trabajo haciendo clic en el botón limpiar y llenando nuevamente los campos.

El registro es guardado en la tabla siguiente.



The screenshot shows a software interface with a blue header bar containing a home icon. Below the header is an orange button labeled "Limpiar un registro". Underneath the button is a table with a blue header row. The table columns are labeled as follows:

Fecha de inicio de la medición	Fecha de finalización de la medición	Hora de inicio de la medición	Hora de finalización de la medición	Código de dispositivo de medición	Nombre c
--------------------------------	--------------------------------------	-------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------	----------

Si se desea eliminar un registro se debe colocar en la celda de Fecha de inicio de la medición que corresponde a la fila que contiene el registro completo, y se debe hacer clic en el botón limpiar un registro.

12. Plantilla muestreo estudios ambientales



El manejo de esta plantilla es idéntico a la anterior se debe hacer clic en el botón agregar datos.



Ingresar datos

Se abrirá el siguiente formulario que debe ser completado y guardado en una tabla de registro.

Ingresar Datos Muestreo En Estudios Ambientales ×

Fecha de inicio de la medición	<input type="text"/>		
Hora de inicio de la medición	<input type="text"/>		
Fecha de finalización de la medición	<input type="text"/>		
Hora de finalización de la medición	<input type="text"/>		
Nombre de la persona que realiza la medición	<input type="text"/>		
Código de dispositivo de muestreo	<input type="text"/>		
Época del año donde se realizó la medición	<input type="text"/>		
Tipo de estudio ambiental	<input type="text"/>		
pa (g) (peso del dispositivo antes del muestreo):	<input type="text"/>	pd (g) (peso del dispositivo después del	<input type="text"/>
Observaciones	<input type="text"/>		
<input type="button" value="Agregar"/>		<input type="button" value="Limpiar"/>	

El botón limpiar un registro tiene el mismo funcionamiento que en la plantilla anterior.

13. Plantilla cálculos muestreo

En esta plantilla se calculará de manera automática la concentración de radón del dispositivo de muestreo, para lograr esto, primero se deben ingresar los datos siguientes:

Calculo de concentración de radón

Tipo de muestreo:

Código de dispositivo de muestreo:

N (s⁻¹) (cuentas netas):

ts (s) (tiempo de exposición):

ε (s⁻¹*Bq⁻¹) (eficiencia del detector):

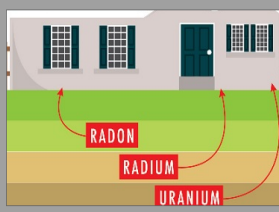
td (s) (tiempo transcurrido desde la finalizacion de la exposicion y el inicio del conteo):

CF (m³/s)(factor de calibración):

DF (factor de decaimiento):

CRn (Bq/m³) (Concentración de radón):

Concentración de radón
CRn=(N)/(ts* ε *CF*DF)



Calcular

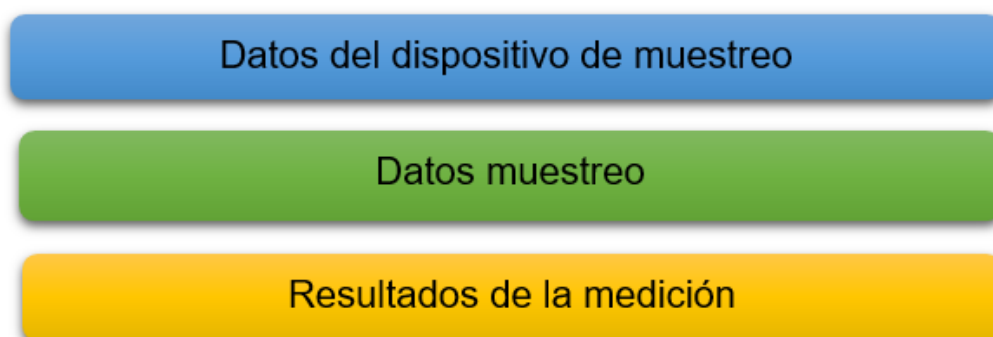
Guardar Limpiar

Los valores de eficiencia y DF se calculan con las formulas planteadas en la plantilla de Cálculos de calibración, en el caso del Factor de calibración se debe de leer antes en el gráfico de CF vs Δp (para la diferencia de peso medida en el laboratorio para el dispositivo), el gráfico de CF a utilizar dependerá de la humedad y temperatura de muestreo, ya que estos parámetros deben ser similares a los utilizados en la calibración, esto con el objetivo de obtener un factor de calibración confiable.

Para eliminar un registro se pulsa el botón Eliminar registro, el cual funciona de la misma manera que en las plantillas anteriores

14. Plantilla informe final

Esta plantilla es un resumen de todos los datos importantes del dispositivo de muestreo utilizado en campo, contiene los datos desde generalidades del dispositivo, datos de muestreo y resultados finales. Para ingresar cada set de datos se hace clic en los siguientes botones.



Cada botón desplegara los formularios siguientes:



Datos del dispositivo de muestreo ×

Datos del dispositivo de muestreo

Código	Fecha de recepción del dispositivo	Hora de recepción del dispositivo
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Nombre del cliente

Características u observaciones del
dispositivo de muestreo



Datos del muestreo



Datos del muestreo

<p>Fecha de inicio de muestreo</p> <input type="text"/>	<p>Hora de inicio de muestreo</p> <input type="text"/>
<p>Fecha de finalización de muestreo</p> <input type="text"/>	<p>Hora de finalización de muestreo</p> <input type="text"/>
<p>Nombre de la persona que realizo el muestreo</p> <input type="text"/>	
<p>Tipo de muestreo</p> <input type="text"/>	
<p>Observaciones</p> <input type="text"/>	
<input type="button" value="Guardar"/>	<input type="button" value="Cancelar"/>

Resultados de la medición ×

Resultados de la medición

Temperatura de calibración (°C)	Humedad de calibración (%H)
<input type="text"/>	<input type="text"/>
CF (Factor de calibración) (m ³ /s)	Concentración de radón (Bq/m ³)
<input type="text"/>	<input type="text"/>
Observaciones	
<input type="text"/>	
Fecha de emisión	
<input type="text"/>	
<input type="button" value="Guardar"/>	<input type="button" value="Cancelar"/>

Completado el ingreso de todo los datos se generara un informe completo del dispositivo el cual se puede imprimir y firma para entregar a la persona que solicito la medición.

INFORME DE ESTIMACION DE CONCENTRACION DE GAS RADON EN AIRE APLICANDO CENTELLEO LÍQUIDO.

Datos del dispositivo de muestreo

Código	Fecha de recepción del dispositivo	Hora de recepción del dispositivo
--------	------------------------------------	-----------------------------------

Nombre del cliente

Características u observaciones del dispositivo de muestreo

Datos del muestreo

Fecha de inicio de muestreo	Hora de inicio de muestreo
-----------------------------	----------------------------

Fecha de finalización de muestreo	Fecha de finalización de muestreo
-----------------------------------	-----------------------------------

Nombre de la persona que realizó el muestreo

Tipo de muestreo

Observaciones

Resultados de la medición

Temperatura de calibración (°C)	Humedad de calibración (%H)
---------------------------------	-----------------------------

CF (Factor de calibración)(m ³ /s)	Concentración de radón (Bq/m ³)
---	---

Observaciones

Firma del responsable

Fecha de emisión