



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



SECRETARIA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VERACRUZ

“ESTUDIO RADIOLOGICO DE AGUA DE CONSUMO HUMANO EN ZONAS
RURALES DE LA ZONA CENTRO DEL ESTADO DE VERACRUZ”

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA

M.I.A. JORGE ALBERTO VASQUEZ CONTRERAS

DIRECTORA DE TESIS

DRA. OLAYA PIRENE CASTELLANOS ONORIO

CO-DIRECTORA

DRA. MARÍA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHÁVEZ

FEBRERO 2023

BOCA DEL RÍO, VERACRUZ, MÉXICO

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	2
LISTA DE TABLAS.....	4
LISTA DE ANEXOS.....	7
1.INTRODUCCIÓN	14
2.JUSTIFICACIÓN	16
3.ANTECEDENTES	18
4.MARCO TEORICO.....	27
5.HIPOTESIS	46
6.1 OBJETIVOS	47
6.2.OBJETIVO GENERAL.....	47
6.3. OBJETIVOS PARTICULARES	47
7. MATERIAL Y MÉTODOS	48
7.1 Área de estudio y muestreo de agua.....	48
7.2 Toma de muestras.....	49
7.3 Método de prueba	49
7.4 Determinación de actividades alfa y beta global por un Contador Proporcional de Flujo de Gas (GFPC).....	50
7.5 Estimación de la dosis efectiva anual.....	51
8. RESULTADOS Y DISCUSIONES	55
9. CONCLUSIONES.....	79
10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	81

LISTA DE FIGURAS

Fig.1 Estructura atómica	27
Fig.2: Serie de desintegración radiactiva del ^{238}U	35
Fig.3 Distribución mundial de exposición a fuentes naturales y artificiales	38
Fig.4 Productos de radiolisis	40
Fig.5 Principio de funcionamiento de un detector gaseoso	43
Fig. 6: Vías atmosféricas que conducen a la exposición humana.	44
Fig. 7: Vías acuáticas que conducen a la exposición humana	45
Fig.8 Ubicación de los municipios donde se colectaron las muestras	48
Fig. 9: Concentración mínima detectable alfa para los estadios de secas y lluvias.	55
Fig. 10 Concentración mínima detectable beta para los estadios de secas y lluvias.	56
Fig.11 Correlación de muestras con actividad alfa y beta en estación de secas	64
Fig.12 Correlación de muestras con actividad alfa y beta en estación de lluvias	64
Fig.13 Dosis efectiva anual en estaciones de secas y lluvias para el ^{226}Ra	66
Fig.14 Dosis efectiva anual en estaciones de secas y lluvias para el ^{210}Po	66
Fig.15 Dosis efectiva anual en estaciones de secas y lluvias para el ^{228}Ra	67
Fig.16 Dosis efectiva anual en estaciones de secas y lluvias para el ^{210}Pb	67
Fig.17 Tipos de suelo para el Estado de Veracruz	69

Fig.18 Comparación de medias aritméticas de la concentración de actividad alfa en las localidades de Estudio en la Zona rural del Estado de Veracruz, para el estadio de secas	71
Fig. 19: Comparación de medias aritméticas de las localidades de Estudio en la Zona rural del Estado de Veracruz en época de lluvias para la concentración de actividad radiológica Alfa.	72
Fig.20. Comportamiento del promedio de conteo alfa e incertidumbre a diferentes intervalos de tiempo en blanco alfa beta en ambos detectores	99
Fig.21 Comportamiento del promedio de conteo beta e incertidumbre a diferentes intervalos de tiempo en blanco alfa beta en ambos detectores	103
Fig. 22. Comportamiento del promedio de conteo alfa e incertidumbre a diferentes intervalos de tiempo en plancheta metálica acanalada en ambos detectores.	105
Fig. 23 Comportamiento del promedio de conteo alfa e incertidumbre a diferentes intervalos de tiempo en plancheta metálica acanalada en ambos detectores.	105
Fig.24 Respuesta analítica de CR-1 alfa con modelo matemático de ajuste	111
Fig.25 Respuesta analítica de CR-2 alfa con modelo matemático de ajuste	112
Fig.26 Respuesta analítica del CR-1 con fuente beta y curva ajustada	114
Fig.27 Respuesta analítica del CR-2 con fuente beta y curva ajustada	115

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Dosis de radiación promedio de fuentes naturales	37
Tabla 2. Especificaciones sanitarias para radiactividad NOM-127-SSA1-2021	41
Tabla 3. Especificaciones sanitarias para radiactividad NOM-201-SSA1-2015	41
Tabla 4. Métodos para el análisis alfa beta total en agua potable	42
Tabla 5. Acciones de Vigilancia de la EPA (1986)	53
Tabla 6 Resultados de concentración de actividad en estadios de secas y de lluvias	58
Tabla 7. Valores medios de concentración de actividad alfa y beta global en secas	61
Tabla 8: Valores medios de Concentración de Actividad Alfa y Beta Global en Lluvias.	62
Tabla 9. Resultados de concentración de actividad alfa y beta global en otros países.	63
Tabla 10. Dosis efectiva anual en estaciones de secas y lluvia en la zona de estudio.	65
Tabla 11 Análisis de Varianza (ANOVA) de los datos muestreados en la estación de secas de las 22 localidades del estado de Veracruz.	70
Tabla 12. Análisis de Varianza (ANOVA) de los datos muestreados en la estación de lluvias de las 22 localidades del estado de Veracruz para la concentración alfa.	72
Tabla 13. Comparación para todos los pares usando Tukey Kramer HSD concentración de actividad beta en secas.	73
Tabla 14. Comparación para todos los pares usando Tukey Kramer HSD concentración de actividad beta en lluvias.	74
Tabla 15. Valores promedio de conteo alfa y beta e incertidumbre a diferentes intervalos de tiempo en blanco alfa/beta en detectores CR-1y CR-2.	102
Tabla 16. Valores promedio de conteo alfa y beta e incertidumbre a diferentes intervalos de tiempo 5,10,30,60,120, y 180 minutos con plancheta acanalada en CR-1y CR-2.	104

Tabla 17. Conteos de 1 minuto con fuente estándar sellada Trinuclido.	106
Tabla 18. Conteos de 1 minuto con fuente estándar sellada de estroncio 90.	107
Tabla 19. Conteos de 60 minutos con fuente estándar sellada Trinuclido alfa	108
Tabla 20. Conteos de 60 minutos con fuente estándar sellada de estroncio 90.	108
Tabla 21. Conteos de 120 minutos con fuente estándar sellada Trinuclido.	109
Tabla 22. Conteos de 120 minutos con fuente estándar sellada de estroncio 90.	109
Tabla 23. Respuesta analítica de intervalo lineal con 6 niveles, fuente alfa.	110
Tabla 24. Respuesta analítica de intervalo lineal con 6 niveles, fuente beta.	112
Tabla 25. Conteos Alfa en CR-1 y CR-2 en diferentes geometrías.	115
Tabla 26. Conteos Beta en CR-1 y CR-2 en diferentes geometrías.	116
Tabla 27. Resumen de repetibilidad y reproducibilidad alfa beta a diferentes tiempos.	117
Tabla 28. Intervalo lineal para alfa en los equipos con valores de correlación.	118
Tabla 29. Intervalo lineal para beta en los equipos con valores de correlación.	114
Tabla 30. Resumen de los límites de detección y cuantificación para alfa y beta en Varias geometrías.	119
Tabla 31. Límite de detección y cuantificación a 60 y 120 minutos con fuente beta en varias geometrías.	120
Tabla 32. Límite de detección y cuantificación en el CR-1 y CR-2 para la geometría blanco alfa beta total con una fuente alfa.	121
Tabla 33. Límite de detección y cuantificación en el CR-1 y CR-2 para la geometría blanco alfa beta total con una fuente beta.	121
Tabla 34. Análisis de varianza de los conteos realizados a tasas alfa y beta de conteo.	122
Tabla 35. Promedio del conteo como porcentaje de traslape en CR-1 y CR-2.	123
Tabla 36. Resumen de los resultados obtenidos y los criterios de aceptación.	123

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Validación del sistema de conteo alfa y beta total.	97
Anexo 2 Superficie estatal por grupo de suelo dominante.	129

AGRADECIMIENTOS

A Dra. Olaya Pirene Castellanos Onorio

Dra. María del Refugio Castañeda Chávez

Gracias por haber sido mis asesoras, amigas y un ejemplo a seguir ya que con su comprensión y experiencia fue posible la realización de mi tesis y por la oportunidad que me brindaron al compartir sus conocimientos, así como sus valiosas ideas.

Al Biol. Ricardo Velázquez Moctezuma

Gracias por el apoyo incondicional al otorgarme las facilidades para la realización de los análisis en el Departamento de Control Radiológico del LESP de Veracruz. y las aportaciones con que contribuyo en la realización de esta investigación.

Al comité revisor

Dra. Paula Zúñiga Ruíz

Dr. Mario Díaz González

Dra. Virginia Alcántara Méndez

Dr. Arturo García Saldaña

Gracias por sus aportaciones al revisar este trabajo.

A todos mis amigos y compañeros de trabajo del LESP de Veracruz que de alguna u otra forma me ayudaron y/o colaboraron en la realización de este trabajo.

A todos mis compañeros del instituto tecnológico de Veracruz y de Boca del Río-TNM por estar ahí cuando se les requirió.

A todos ellos gracias

A todas las personas que de una forma desinteresada contribuyeron a proporcionar el agua para analizarla y realizar este trabajo de investigación.

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de vivir y
ser tan bueno conmigo.

A mis padres Margarita [†] y Ángel por el gran amor y
cariño que me brindaron,
por su comprensión y apoyo, pero, sobre todo,
por otorgarme toda su confianza y apoyo.

A mi esposa Eulalia por quererme tanto y
apoyarme en los momentos más difíciles.

A mis hijos Jorge y Derick por ser un motivo
de existencia y superación.

A mis hermanos Cecilia y Ángel [†] por compartir
juntos la alegría de vivir.

Study and spatiotemporal radiological characterization of water for human use and consumption in the main rural populations of the center of the State of Veracruz was carried out, covering 22 municipalities. The objective was to estimate the annual effective dose as a function of the concentration of gross alpha and beta activity. For this purpose, a low background proportional flux detection system calibrated with NIST-traceable radioactive standards was used. Sampling included only wells, springs and lagoons in rural areas that supply water to these populations. The decision was based on the fact that these do not have a physicochemical treatment and were carried out during the dry and rainy season, which became factors of impact on the radiological material. The analysis included the results of 195 samples from 22 municipalities which showed ranges in gross alpha of 0.052-0.95 BqL⁻¹ with a mean of 0.376 ± 0.101 BqL⁻¹ and in gross beta of 0.034-1.48 BqL⁻¹ with a mean of 0.389 ± 0.108 BqL⁻¹. The comparison of the values obtained with respect to those of other countries and their complement with analysis of variance showed that there was a significant difference. Particularly, for the results of gross alpha in the municipality of Alto Lucero de Gutierrez Barrios and in gross beta in Nautla and Tecolutla in dry and rainy seasons as opposed to other municipalities, at a probability of $p \leq 0.05$ with the Tukey-Kramer HSD statistical test. A correlation between gross alpha and gross beta was also performed with a r of -0.18 and -0.44 in dry and rainy seasons. This means that among the radionuclides the major sources of beta radiation are uranium and thorium decay series radionuclides. For the determination of gross alpha, the municipalities in the mountainous zones showed lower values of this activity than the municipalities in the coastal zone. Gross alpha activity values of 0.95 ± 0.11 BqL⁻¹ were detected in the municipality of Alto Lucero de Gutiérrez Barrios in the locality of Arroyo Agrio, which exceeded the limit of the Official Mexican Standard.

Key words: Radiactivity, Gross Alpha and Beta Activity, The annual effective dose

RESUMEN

Se realizó un estudio y caracterización espacio temporal radiológico del agua de uso y consumo humano en las poblaciones rurales del Centro del Estado de Veracruz, para 22 municipios. El objetivo fue estimar la dosis anual efectiva en función de la concentración de actividad alfa y beta global. Para lo cual se empleó un sistema de detección proporcional de flujo de bajo fondo calibrado con patrones radiactivos trazabilidad NIST. La toma de muestras incluyó solo los pozos, manantiales y lagunas de las zonas rurales que abastecen agua a las poblaciones; la decisión se fundamentó en que éstas no tienen un tratamiento fisicoquímico y fueron realizados en las estaciones de secas y lluvia como factores de impacto al material radiológico. El análisis incluyó los resultados de 195 muestras para 22 municipios, la actividad alfa global presentó un rango de 0.052-0.95 BqL⁻¹ con una media de 0.38 ± 0.10 BqL⁻¹ y para beta global de 0.034-1.4 BqL⁻¹ con una media de 0.389 ± 0.108 BqL⁻¹. La comparación de los valores obtenidos con autores como Bem 2014, Obrikat 2004, Jancovic 2012, y su complemento con análisis de varianza demostró que existe diferencia significativa para los resultados de alfa global en el municipio de Alto Lucero de Gutiérrez Barrios y en beta global en Nautla y Tecolutla en las estaciones de secas y lluvia con los demás municipios, a una probabilidad de $p \leq 0.05$ con la prueba estadística de Tukey-Kramer HSD. Asimismo se realizó una correlación entre alfa global y beta global con una r de -0.18 y -0.44 para las estaciones de secas y lluvia con resultados que infieren que la mayoría de radionúclidos presentes en las concentraciones de alfa y beta global fueron de la serie de decaimiento de potasio, torio y uranio, También se calculó la dosis efectiva anual para adultos en los radionúclidos de ²²⁶Ra, ²¹⁰Po, ²²⁸Ra y ²¹⁰Pb, con valores por arriba de la referencia que establece el organismo internacional de energía atómica y la organización mundial de la salud excepto para el radionúclido ²²⁶Ra. Para la determinación de alfa global, los municipios de zonas serranas presentaron valores menores en la actividad alfa global que los

municipios de la zona costera. Se detectaron valores puntuales de actividad alfa global en el municipio de Alto Lucero en la localidad de Arroyo Agrío del $0.95 \pm 0.11 \text{ BqL}^{-1}$ que superó el valor de referencia de la norma oficial mexicana NOM-127-SSA-2021.cabe hacer mención que cuando se realizó este trabajo de investigación estaba la norma oficial mexicana con modificación NOM-127-SSA1-1994 Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

1. INTRODUCCIÓN

Si bien el agua es un elemento esencial para la vida de todos los seres vivientes del planeta, además es un derecho humano fundamental (Rickert et al, 2016). Se estima que la composición del agua es de 97.2% del agua en el planeta Tierra es salina y solo el 2.5% corresponde a agua fresca; de ese 2.5%, 30% es subterránea, 68% está en los glaciares y otras capas de nieve y solo el 1.2% es superficial y se encuentra en ríos, lagos y otras formas de agua de superficie (Gleick et al, 1993). Con todo esto es poca el agua que se aplica al consumo y uso humano y que cumple con los requisitos y calidad desde el punto de vista sanitario, contemplando los factores químicos, biológicos y físicos entre los físicos esta la radiactividad ya que El monitoreo de contaminantes radiológicos se ha establecido por diferentes legislaciones como una premisa dado el interés de los ciudadanos por las actividades humanas y los accidentes como Chernobyl y Fukushima la importancia de monitorear radiológicamente el agua y los alimentos que consume la población si bien en Europa los estados miembros de la comunidad europea tiene la obligación legal de monitorear la radiactividad en el ambiente desde la firma del tratado Euratom. Sin embargo, en el continente americano tiene predominio los niveles del OIEA, WHO y EPA. Los radionúclidos pueden ser de origen natural o artificial, los radionúclidos de origen natural están presentes en diferentes concentraciones en el agua, ya que depende de factores como los procesos de erosión y disolución algunos de ellos como: ^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra , ^{222}Rn , de abundancia relativa en la corteza terrestre, son los más abundantes en el agua. Y su presencia está sujeta a la solubilidad que poseen (Ivanovich M, Harmon RS, 1992).

La OMS propone un método de indicadores, donde se establecen valores límites para la toma de decisiones. También como indicadores a las partículas alfa y betas totales, las cuales se determinan sin conocer la identidad específica de los

radionúclidos que la provocan. Propone como valor para alfa total 0.5 Bq/L, y 1.0 Bq/L para la actividad beta total, tomando en consideración los radionúclidos críticos que pueden ser responsables de estas emisiones, así como no rebasar 0.1 mSv/año de dosis efectiva. Propone además como estrategia, considerar si cualquiera de los dos valores es rebasado, el identificar los radionúclidos que la provocan, estimar las dosis parciales y la integrada, así como establecer medidas para el suministro de agua. En México en referencia a los parámetros radiológicos y límites de control, se cuenta con la NOM-127-SSA1-2021 que contempla parámetros de radiactividad alfa global con un límite de 0.5 BqL⁻¹ y el parámetro de radiactividad beta global con un límite de 1.0 BqL⁻¹ son indicadores del riesgo radiológico y nos indican también la posibilidad de que exista radiactividad natural asociada a elementos del decaimiento de las cadenas del Uranio y Torio e evidencian principalmente la presencia de ²²⁶Ra y ²²⁸Ra. Así también toma en cuenta la presencia de Potasio de origen natural, ampliamente distribuido en la naturaleza.

La población del planeta según datos del Comité Científico de las Naciones Unidas (UNSCEAR) recibe una dosis per cápita de 2.8072 mSv, de los cuales 2.4 mSv se deben al fondo natural, y de ellos 1.2 son recibidos a través de la inhalación y 0.3 por ingestión. Si bien en el panorama mundial existen estudios de mediciones realizadas como en Alemania que no superan los límites establecidos de concentración de actividad alfa y beta con un valor medio de exposición a la radiación para niños de 0.047 mSv por año. (Obrikat, 2004).

2. JUSTIFICACIÓN

No obstante de que se cuenta con una norma que establece los valores máximos permisibles de radiactividad alfa y beta global en agua de consumo humano (NOM 127 -SSA1- 2021) la secretaria de salud (SSA), y la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) no tiene identificada la probabilidad de riesgo de contaminación radiactiva de agua de uso y consumo humano en zonas rurales, ya que la mayoría de los trabajos de investigación no vislumbran la asociación de las muestras con el origen del agua, orografía, abundancia de lluvias, la densidad poblacional y la calidad radiológica del agua de tomas subterráneas, pozos, y manantiales. puesto que no tienen ningún estudio que evidencie este riesgo.

La Comisión Federal para Protección de Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) ha realizado trabajos de investigación para determinar la concentración de actividad alfa beta en ciudades de gran densidad poblacional este trabajo de investigación contempla el análisis de concentración de actividad en las zonas rurales.

Dentro de nuestro país tenemos diferentes instancias que tienen competencia en lo que se refiere a la aplicación de esta normativa, como es la Comisión Nacional del Agua, Organismos estatales y compañías privadas responsables de suministrar el agua con la calidad establecida por esta norma, así como la propia secretaría de Salud en su función de vigilancia del riesgo a la salud por su consumo.

Para los aspectos radiológicos en la función de organismo regulador, de vigilancia y de salvaguardia de fuentes radiactivas la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas contempló en 1999, dentro de su Sistema nacional de vigilancia Radiológica Ambiental , el cual tiene como objetivo obtener una imagen permanente de la situación radiológica ambiental del país, un Programa de análisis de Agua de Uso y Consumo Humano, mediante colaboración con la SSA, tomando y analizando del orden de 640 muestras, provenientes de 32 estados de la República (Aguirre et al, 2007) .

Los datos que se han publicado sobre este tema dan una imagen de la situación que guarda radiológicamente el agua de consumo humano en zonas de elevada densidad poblacional como el reportado por la COFEPRIS, sin embargo, estos no vislumbran la asociación de las muestras con el origen del agua y situaciones orográficas, de abundancia de lluvias, así como el impacto de dosis en función de la población rural y la calidad radiológica del agua de uso y consumo humano lo que justifica el haber realizado este estudio radiológico de agua de uso y consumo humano en las zonas rurales de la Zona centro del estado de Veracruz.

A nivel nacional las circunstancias que rodean la concentración de minerales es diversa, tanto por motivos climáticos como geológicos lo que si justifica realizar un estudio de investigación de la calidad del agua radiológicamente como un derecho de la población en las zonas rurales a alcanzar este recurso hídrico con características inocuas para su uso y consumo.

Asegurar que en los estudios epidemiológicos de daños por ingestión de alimentos no se han incluido estos parámetros como factores de riesgo.

3. ANTECEDENTES

Si bien la presencia de un radionúclido en el agua como la subterránea depende de fenómenos complejos químicos y geológicos, (Michael F. Arndt) establece que las propiedades químicas contribuyen a determinar la cantidad de radionúclidos en el agua, un caso estudiado es el Uranio que dependiendo de su estado de oxidación sea +4 será insoluble y precipite en la solución o permanezca soluble como el uranilo con un estado de oxidación de +6 uranilo soluble UO^{+2} ya que depende de la cantidad de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua, altas concentraciones de sólidos disueltos son predecibles altas concentraciones de radio, el uranio puede existir en el agua subterránea como resultado de la solubilidad de sus compuestos en el tránsito de corrientes o por infiltración de capas superiores incluyendo la superficie. En agua superficial como resultado fundamentalmente de la solubilidad de los elementos de minerales diversos y mediante escorrentía principalmente. Si bien los radionúclidos de origen natural están presentes en el agua potable en diferentes cantidades y que por procesos de erosión y disolución traen elementos radiactivos desde las rocas y minerales hasta el agua misma.

Para la calidad del agua potable se basan en la suposición de que en el caso de la ingestión de radionúclidos durante períodos prolongados de tiempo, la tasa de dosis efectiva resultante no debe exceder de 0,1 mSv/año, sin embargo también existe la contribución de radionúclidos por inhalación al hervir el agua o por el uso de la misma al bañarse, lavar los trastes, regar el jardín, y que no debe de perderse de vista, en países como Polonia se ha determinado la contribución del ^{222}Rn por centelleo líquido teniendo una media geométrica de 1.92 Bq/L presentándose el radón en el agua de los pozos en agua subterránea (Henryk Bem et al), sin embargo en Veracruz México no se han llevado a cabo estos estudios en zonas rurales que es donde están más desprotegidos ya que no utilizan prácticamente ningún sistema de tratamiento como en las grandes ciudades con

sus plantas de tratamiento de agua para uso y consumo humano utilizando tratamientos primarios, secundarios y terciarios incluso membranas de zeolitas y osmosis inversa.

En el continente de Europa los estudios radiológicos realizados en diferentes países como Alemania las concentraciones de ^{226}Ra y ^{228}Ra , radionúclidos naturales en agua mineral no superan los límites establecidos de concentración de actividad alfa y beta teniendo en consideración que ^{226}Ra es emisor alfa y el ^{228}Ra es emisor beta, observando un valor medio de exposición a la radiación para niños de 0.047 mSv por año. (Obrikat, 2004).

En Croacia la dosis efectiva obtenida por la ingesta de agua embotellada supera los límites, para ^{226}Ra emisor alfa siete veces superior a la recomendada por la Organización mundial de la salud y presentando una concentración de actividad alfa total con valores de 6-412 mBq/L (Bronzovic, 2005).

En Italia se evaluó la calidad radiológica del agua potable obteniendo resultados del orden de mayor a menor 26 ± 36 ^{234}U > 21 ± 30 ^{238}U > 8.9 ± 15 ^{226}Ra > 4.8 ± 6.3 ^{228}Ra > 4.0 ± 4.1 ^{210}Pb > 3.2 ± 3.7 ^{210}Po > 2.7 ± 1.2 ^{212}Pb > 1.4 ± 1.8 ^{224}Ra > 1.1 ± 1.3 ^{235}U > 0.26 ± 0.39 ^{228}Th > 0.0023 ± 0.0009 ^{230}Th > 0.0013 ± 0.0006 ^{232}Th mBq/L, las determinaciones se realizaron por las normas ISO 9696 e ISO 9697 y las concentraciones de actividad estuvieron por debajo de los niveles recomendados por la OMS para el agua potable 0,1 y 1,0 Bq / L para la actividad alfa total y beta total, respectivamente (Jia, 2009).

Serbia realizó estudios de Radionúclidos naturales, las actividades alfa y beta total se midieron en agua mineral embotellada producida en Serbia para evaluar su calidad radiológica en agua del grifo y en agua de manantial, la concentración de tritio en agua mineral embotellada osciló entre $0,023 \pm 0,012$ y la de ^{226}Ra $0,046 \pm 0,006$ Bq/L, la concentración de actividad del, ^{232}Th y del ^{40}K estaban por debajo

de la actividad mínima detectable. Para evaluar la dosis efectiva anual para diferentes clases de edad, se realizó un cálculo dosimétrico conservador y se determinó que la calidad del agua radiológica por actividad natural de los radionúclidos emisores alfa y beta se encuentra dentro del rango recomendado por la Organización Mundial de la Salud (Jankovic, 2012).

Hungría es rica en aguas de manantial por lo que en la región de Balaton se llevó a cabo un estudio de los radionúclidos emisores alfa que se encuentran de forma natural en las aguas de manantial que se visitan con frecuencia y se consumen regularmente. Las concentraciones de actividad de ^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{234}U , ^{238}U y ^{210}Po se determinaron usando espectrometría alfa después de la separación de los elementos de la matriz con lo que se obtuvieron los resultados siguientes La concentración promedio en mBq/L de ^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{234}U , ^{238}U y ^{210}Po en las aguas de manantial varía de 2.1 a 601, de <1.1 a 65.4, de 3.9 a 741.9, de <0.44 a 274.3 y de 2 a 15.2 respectivamente. En la mayoría de los casos, se observó un desequilibrio radiactivo entre los isótopos de uranio y radio. Las dosis para las muestras analizadas de agua de manantial están en el rango de 3,59-166,73 μSv por año con un promedio de 18,2 μSv por año. Esto está muy por debajo del nivel de referencia de 100 μSv por año de la dosis efectiva comprometida recomendada por la OMS. Solo una muestra de agua tuvo una dosis superior a 100 μSv por año, principalmente debido a la contribución del radio (^{226}Ra , ^{224}Ra) y los isótopos ^{210}Po . (Jobbágy,2010).

En Polonia La concentración de actividad del radionúclido ^{222}Rn se determinó en muestras de agua potable de la región sur de Polonia mediante la técnica de centelleo líquido presento en sus análisis valores elevados para radón ^{222}Rn siendo su preocupación la inhalación en sus recursos hídricos y no en su ingestión de la misma los Valores medidos oscilaron entre 0.42 y 10.52 Bq/L con el valor medio geométrico de 1,92 Bq/L. Las dosis efectivas anuales promedio calculadas de la ingestión con agua y la inhalación de este radionúclido que escapa del agua

fueron 1,15 y 11,8 μSv , respectivamente. Por lo tanto, debe subrayarse que, en general, no es la ingestión de radionucleidos naturales con agua sino la inhalación del radón que se escapa del agua lo que constituye una parte sustancial del riesgo radiológico debido a la presencia de radionucleidos naturales de las series del uranio y torio. en el agua potable de la región sur de Polonia (Bem,2014).

En Turquía La evaluación radiológica de aguas minerales embotelladas y aguas termales recolectadas de diversas fuentes naturales se llevó a cabo utilizando técnicas de recuento alfa total y beta total arrojó los siguientes resultados la concentración de actividad alfa total media era de 164 mBq/L (mínimo: 7 mBq/L; máximo: 3042 mBq/L), mientras que se encontró que la concentración total de actividad beta media era de 555 mBq/L (mínimo: 21 mBq/L; máximo: 4845 mBq/L). Para las muestras de agua termal, se obtuvo una concentración de actividad alfa total media de 663 mBq/L (mínimo: 18 mBq/L; máximo: 3070 mBq/L). La concentración total de actividad beta para estas muestras, por otro lado, se determinó en 3314 mBq/L (mínimo: 79 mBq/L; máximo: 17955 mBq/L). Estos valores originan dosis efectivas anuales medias de 313 μSv para aguas minerales y 1805 μSv para aguas termales, que resultan superiores a los valores de referencia y recomendadas para aguas potables por la Organización Mundial de la Salud, (Taskin,2013).

En el continente de Asia se han realizado también estudios de la calidad de agua para caracterizar el agua y evaluar la dosis a través de la ingesta por medio de análisis de concentración alfa y beta total, Pakistán realizó la Medición de radiactividad natural en agua potable embotellada en la capital federal Islamabad usando la técnica de espectrometría gamma donde se registró concentraciones medias de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K eran 11.3 ± 2.3 , 5.2 ± 0.4 y 140.9 ± 30.6 mBq/L, respectivamente. Las dosis efectivas acumuladas anuales debidas a los tres radionúclidos naturales para diferentes grupos de edad de 1 a 5 años, 5 a 10 años, 10 a 15 años y adultos (> 18 años) se estimaron en 4.0, 3.4, 3.1 y 4.1 μSv por

año, respectivamente considerándose por debajo de los límites de referencia de la Organización mundial de la salud. (Fatima,2007).

Vietnam realizó análisis de concentración de actividad alfa y beta total de muestras de agua subterránea recolectadas y analizadas por contadores proporcionales de flujo de gas en el sur de Vietnam, para determinar la dosis eficaz de ingestión y con ello la prevención de riesgos para la salud pública asociada en vietnam la dosis efectiva anual para adultos (> 17 años) se calculó basándose en el supuesto de que los principales radionucleidos tienen los factores de conversión de dosis efectivos más altos. En general, se observó que los resultados para ^{210}Pb , ^{226}Ra y ^{228}Ra eran inferiores a los valores de referencia recomendados establecidos por la Organización Mundial de la Salud y la Agencia Internacional de Energía Atómica, excepto por el valor de ^{210}Po . Los resultados de alfa total en las muestras de agua variaron de 0.024 a 0.748 Bq/L con una media de 0.183 ± 0.034 Bq/L, y los resultados beta total en las muestras de agua variaron de 0.027-0.632 Bq/L con una media de $0,152 \pm 0,015$ Bq/L. (Ho,2020).

En Kazajstán se realizó análisis radioquímicos de los isótopos de Uranio (^{234}U , ^{235}U y ^{238}U) y sus relaciones de actividad se obtuvieron para los análisis de agua de pozo como fuente local de agua potable recolectada de los diez asentamientos alrededor del Sitio de Pruebas Nucleares de Semipalatinsk (SNTS), con los siguientes resultados el ^{238}U varía ampliamente de 3.6 a 356 mBq/L (0.3-28.7 $\mu\text{g/L}$), con un factor de aproximadamente 100. Las concentraciones de ^{238}U en algunas muestras de agua de los asentamientos Dolon, Tailan, Sarzhal y Karaul son comparables al más alto que la guía restrictiva propuesta por la Organización Mundial de la Salud de 15 $\mu\text{g(U)/L}$. Las relaciones de actividad de $^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$ en las muestras de agua analizadas son superiores a 1 y varían entre 1,1 y 7,9, siendo en su mayoría de 1,5 a 3. Las relaciones de actividad de $^{235}\text{U} / ^{238}\text{U}$ medidas son alrededor de 0,046, lo que indica que el Uranio en estas aguas de pozo es de origen natural. Es probable que la elevada concentración de ^{238}U encontrada en

algunos asentamientos alrededor del sitio de pruebas nucleares no se deba a la lluvia radiactiva cercana a las explosiones nucleares en el Sitio, sino más bien a la intensa erosión de las rocas, incluido el Uranio allí. Las dosis efectivas calculadas para adultos resultantes del consumo de las aguas investigadas están en el rango de 1.0 a 18.7 μSv por año. Esas dosis son inferiores al valor de referencia de la OMS y el OIEA (100 μSv por año) para el agua potable. (Yamamoto,2010).

En Túnez Se han determinado las concentraciones de actividad ^{234}U y ^{238}U y sus dosis efectivas relativas en aguas minerales embotelladas a través de la técnica de espectrometría alfa se midió los isotopos de uranio. La relación isotópica obtenida $^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$ varía entre 1,1 y 3, lo que significa que los dos isótopos no están en equilibrio radiactivo. La concentración de actividad medida varía entre 3,2 y 40 mBq/L para ^{234}U y entre 1,5 y 26,3 mBq/L para ^{238}U . Se encontró que las dosis efectivas (asumiendo 2 litros por día de consumo de agua) provenientes de estos dos isótopos varían entre 0.16 y 2.02 μSv por año, que es menor que el nivel de dosis máximo recomendado por la OMS. (Gharbi,2010).

En Sudáfrica se analizó el agua potable de la zona minera de oro de West Rand y la planta de tratamiento de agua del municipio de Modiri Molema (MMM). Se recolectaron muestras de agua antes y después de la purificación de la planta de tratamiento de agua y se analizaron utilizando el contador de centelleo líquido (LSC) para evaluar los niveles de dosis de radioactividad alfa y beta total de los radionucleidos en el agua. Se utilizó espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) La actividad alfa total mínima y máxima obtenida fue 0.0041 Bq/L y 0.0053 Bq/L respectivamente, mientras que la actividad beta total mínima y máxima obtenida para las muestras de agua fue 0.0083 Bq/L y 0.0105 Bq/L respectivamente. La concentración de actividad del agua potable indica que la actividad específica en el suministro de agua después de la purificación está por debajo del límite de la guía de la OMS de 0.5 Bq/L para alfa total y 1 Bq/L para beta total. Los resultados obtenidos también estuvieron dentro del rango del límite de

calidad del agua objetivo del Departamento de Asuntos Hídricos y Forestales de Sudáfrica de 0-1.38 Bq/L para la actividad beta total. (Madzunya,2020).

En Ghana se determinó los niveles de radiactividad basales de materiales radiactivos naturales Para las muestras de agua, las concentraciones medias de actividad fueron 0.86 ± 0.67 , 0.97 ± 1.33 y 9.05 ± 10.45 Bq/L para ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K , respectivamente. Se estimó que la dosis efectiva anual total para el público era de 0.13 mSv, que está por debajo del nivel recomendado por la Comisión Internacional de Protección Radiológica de 1 mSv para el control de la exposición pública. Los valores de concentración de alfa total y beta total para todas las muestras de agua estaban por debajo de los valores recomendados por la Autoridad de Normas de Ghana y la Organización Mundial de la Salud para la calidad del agua potable. Los resultados obtenidos en este estudio también muestran que los niveles de radiación están dentro de los niveles naturales de radiación de fondo que se encuentran en la literatura. (Faanu,2014).

En Egipto se determinó en agua subterránea los valores de concentración de actividad alfa de 0.008 a 0.040 Bq/L para ^{226}Ra , de 0.003 a 0.019 Bq/L para ^{232}Th y de 0.025 a 0.344 Bq/L para ^{40}K . Considerando una ingesta de 1.5 L por día, se estimó en 8.59, 4.86 y 83.47 Bq por año para ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K , respectivamente. Se encontró que las dosis efectivas estimadas del agua potable fueron para ^{226}Ra : 2.4 μSv por año, ^{232}Th : 1.1 μSv por año, y 0.5 μSv por año en ^{40}K . (Khalil,2009).

En el continente americano se han realizado estudios en México específicamente en el estado de Chihuahua obteniendo los resultados de actividad específica del agua en la presa de San Marcos llegó a 7.7 Bq/L para ^{238}U y 34.78 Bq/L para el ^{234}U . superiores a la norma 127 agua para uso y consumo humano,(Rentería,2021), así como los reportados en ^{226}Ra por Angeles et al en 2020, si bien existe la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-2021, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe

someterse el agua para su potabilización. La cual se modificó para unificar el criterio con la OMS y entrará en vigor hasta el 2023, lo que implica un cambio en la vigilancia actual, es necesario llevar a cabo más análisis de concentración alfa y beta total en las zonas rurales en todo el país.

Argentina durante los últimos 6 años en el laboratorio ambiental de actividad alfa y beta ha llevado a cabo más de 400 determinaciones de la matriz agua potable en las distintas instalaciones, observándose que los promedios de las concentraciones de actividades alfa y beta para las muestras analizadas no superan los estándares internacionales recomendados por la OMS de 0,5 Bq/L y 1 Bq/L respectivamente, (Acosta,2015).

En Brasil se determinó la radiactividad natural de las aguas subterráneas que se encuentran en los sistemas acuíferos sedimentarios (Bauru y Guarani) y de roca fracturada (Serra Geral) en la cuenca sedimentaria de Paraná, Sudamérica, que se utiliza ampliamente para beber, entre otros. Las mediciones de radiactividad alfa total y beta total, así como la concentración de actividad de los radionucleidos disueltos naturales ^{40}K , ^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{210}Po y ^{210}Pb , se realizaron en 80 pozos tubulares perforados en 21 municipios del Estado de São Paulo y su límite con el estado de Mato Grosso do Sul en Brasil. La mayoría de los datos de radiactividad alfa total estaban por debajo de 1 mBq/L, mientras que se encontraron valores que superaban el límite de detección de radiactividad beta total de 30 mBq/L. La solubilidad de los radioelementos en los sistemas estudiados varió según la secuencia radón > radio > otros radionucleidos y la mayor porosidad de las areniscas en relación con los basaltos y diabasas podría justificar la mayor presencia de radón disuelto en el acuífero poroso, (Bonotto,2011).

En Egipto Pakistán, Hungría, Italia, Ghana Brasil, Argentina y Kazajistán los análisis revelaron que los emisores alfa y beta están por debajo de los límites recomendados por WHO logrando una calidad radiológica de agua valores por

debajo de la dosis efectiva anual media al igual que la concentración de actividad alfa y beta total.

Turquía sí supera la concentración alfa y beta total, así como la dosis efectiva anual media en aguas termales y minerales. Serbia con cálculos conservadores se encuentra dentro del rango recomendado por WHO. Vietnam en sus muestras de agua subterránea en la concentración de alfa para Po 210 supera los límites de WHO, en Sudáfrica la concentración es inferior a los límites establecidos por WHO y no compromete la dosis efectiva anual media tomando un valor de 1.38 Bq/L su normativa hídrica.

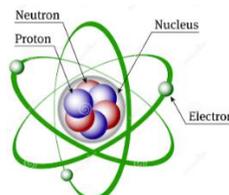
4. MARCO TEORICO

La radiactividad es una propiedad que presentan los átomos inestables, que en un proceso de estabilizarse emiten partículas o energía.

4.1 Estructura Nuclear

El átomo está integrado por diversas partículas subatómicas pero tres partículas subatómicas básicamente para nuestro objeto de estudio denominadas, protón, neutrón y electrón, como se aprecia en la Fig.1 los dos primeros se encuentran en el núcleo ocupando la mayor parte de la masa, los electrones se localizan alrededor del mismo. Los elementos que se encuentran en la tabla periódica y el lugar que ocupan están en función del número atómico, el cual podemos definir como la cantidad de protones que posee z cada átomo de ese elemento.

Fig. 1 Estructura Atómica



Fuente: Dreamstime.com

El Electrón posee una carga eléctrica negativa de -1.6×10^{-19} Coulombs y una masa en reposo de $(m_e) 9.10956 \times 10^{-31}$ kg. Las partículas beta negativa (β^-) emitidas por algunos materiales radiactivos son propiamente electrones en movimiento.

El Protón es una partícula con carga eléctrica positiva de igual magnitud que la del electrón 1.6×10^{-19} Coulombs su masa aproximadamente 1838 veces mayor que la del electrón.

El Neutrón partícula con carga eléctrica neta igual a cero y masa ligeramente superior a la del protón 1.67492×10^{-27} kg.

4.2 Radiación Ionizante, Origen y sus Características.

Comencemos por definir a las radiaciones emitidas en las transformaciones nucleares, y que producen ionización en la materia con quien interactúan por lo que se le llama radiación ionizante. (ININ,2018)

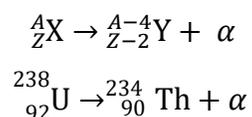
Los rayos X se descubren por primera vez en 1895 por Wilhelm Conrad Roetgen siendo las primeras manifestaciones de radiación que se conocen. Continuando con la galardonada Marie Curie y sus estudios de radiactividad y radiaciones, el termino radiación se utiliza para describir una amplia variedad de emisiones en las transformaciones nucleares en núcleos excitados.

Decaimiento Alfa.

Es una forma de desintegración radiactiva por la cual un núcleo atómico emite una partícula alfa y se convierte en un núcleo con cuatro unidades menos de número másico y dos unidades menos de número atómico, a las partículas alfa se les puede considerar un núcleo de Helio ya que está formada por cuatro unidades de masa atómica y dos protones con carga eléctrica positiva igual al doble de la del protón.(Kocher)

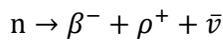
Es típica en núcleos atómicos muy pesados. La reacción que la caracteriza es la siguiente.

Ecuaciones:



Decaimiento beta

Este modo corresponde a la emisión de partículas beta negativas β^- , idénticas en carga eléctrica y masa en reposo al electrón. Son expulsadas del núcleo a velocidades cercanas a la de la luz. Comparadas con las partículas alfa su masa es muy pequeña se produce cuando un neutrón en el núcleo se convierte en un protón y en un electrón que es expulsado de acuerdo a la siguiente reacción.



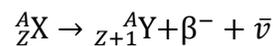
donde:

n = neutrón que se descompone

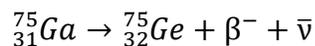
β^- = partícula beta emitida

p^+ = protón que permanece en el núcleo $\bar{\nu}$ = antineutrino emitido

Como aparece un protón, el núcleo original se transforma en un núcleo de otro elemento de acuerdo con la reacción siguiente:

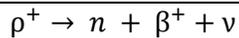


Como ejemplo de este decaimiento tenemos el siguiente



Decaimiento beta positiva

La radiación emitida bajo este modo de decaimiento es una partícula llamada positrón β^+ , idéntica al electrón, pero con carga eléctrica positiva. En estos núcleos un protón se descompone de acuerdo con la siguiente reacción nuclear.



donde:

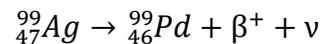
n = neutrón que se genera

β^+ = partícula beta positiva emitida positrón que lleva la carga eléctrica

p^+ = protón que se descompone en el núcleo

ν = neutrino emitido con las mismas características del antineutrino

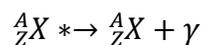
Como ejemplo tenemos el siguiente decaimiento, el núcleo conserva su número de nucleones, pero como se pierde una carga eléctrica positiva y el protón se convierte en un neutrón en la transformación, se llega a otro núclido de otro elemento diferente.



Radiación electromagnética

La radiación electromagnética a que nos referimos es la llamada radiación gamma (γ) cuya naturaleza es similar a otras radiaciones electromagnéticas como los rayos X, la luz visible, las ondas de radio, etc. pero su longitud de onda es mucho menor cuando un núclido es inestable puede alcanzar su estado estable mediante la emisión de un rayo gamma.

La radiactividad γ consiste en la desexcitación de un núcleo producto de una desintegración α o β previas mediante la emisión de radiación electromagnética de alta energía, llamada rayos γ .



La radiación γ se atribuye convencionalmente al isótopo α o β radiactivo que la produce. A veces la energía de excitación se transmite directamente a un electrón del átomo, sin pasar por un fotón intermedio. Esa transmisión se llama conversión interna, y a los electrones emitidos, electrones de conversión interna.

4.2.1 Radiación natural y artificial.

Independientemente de la existencia de radionúclidos de origen artificial, existen en la naturaleza elementos radiactivos naturales, como resultado de:

1. La producción continua mediante reacciones nucleares debidas a la interacción de radiación cósmica con elementos de la atmósfera terrestre, como ejemplo tenemos la producción de Tritio y Carbono-14, ^{14}N (n rápidos, ^3H) ^{12}C y ^{14}N (n lentos, p) ^{14}C .

2. Radioisótopos que forman parte de la mezcla isotópica que compone un elemento y que existen desde la formación de la tierra ya que poseen una vida media muy larga (vida media es un parámetro radiológico que determina el tiempo en que una determinada cantidad del elemento que decae, llega a la mitad de su concentración de actividad).

Los de origen radiogénico, que se forman por decaimiento de otro radioisótopo. Estos radionúclidos son los producidos por las cadenas de decaimiento del ^{232}Th , ^{238}U y ^{235}U , y que por decaimientos sucesivos de padres a hijos radiactivos llegan a elementos estables (^{208}Pb , ^{206}Pb y ^{207}Pb respectivamente). Dentro de la cadena de decaimiento existen radionúclidos de diferentes características químicas como es la habilidad de formar compuestos más o menos solubles; físicas como es, si forman compuestos sólidos o gaseosos y; radiológicas como pueden ser el tipo de emisión y la vida media.

Miembros de la cadena del Uranio 238:

U-238 Th-234, Pa-234, U-234, Th-230, Ra-226, Rn-222, Po-218, Po-214, Pb-214, Bi-214, Po-214, Pb-210, Bi-210, Po-210 y Pb-206 quien es el estable.

Miembros de la cadena del Torio 232

Th-232, Ra-228, Ac-228, Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208, Po-212

Miembros de la cadena del Uranio 235

Th-231, Pa-231, Ac-227, Fr-223, Ra-223, Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Tl-207, Po-211

Nota. - Los radionúclidos en negrillas, corresponden a emisores de partículas alfa.

En general, tenemos radionúclidos naturales que emiten tanto radiaciones gammas, como betas y alfas, pero de acuerdo a la problemática potencial por ingestión de agua y por los efectos de la interacción de la radiación con la materia, los que merecen una mayor atención son los emisores alfa y beta, si bien el agua es un elemento esencial para la vida de todos los seres vivientes del planeta, además es un derecho humano fundamental y si esta contiene elementos radiactivos que pueden tener consecuencias adversas.

La concentración de los diversos elementos radiactivos naturales en el agua depende tanto de procesos también naturales: solubilidad de sales en el recorrido de los cuerpos de agua, explosiones volcánicas entre otras; como de actividades antropogénicas, la minería, el uso de fertilizantes fosfatados, por ejemplo.

Fuentes naturales

- Rayos cósmicos, el nivel de exposición aumenta con la altitud porque no existe ese escudo protector que es la atmósfera
- Fuentes terrestres-suelo UNSCEAR 0.48 mSv como exposición externa anual por fuentes terrestres asociando radionúclidos como ^{232}Th , ^{40}K , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{222}Rn .
- Gas radón ^{218}Po y ^{214}Po producto del decaimiento del radón, genera daño a pulmón por la irradiación de las células en el sistema respiratorio. El promedio mundial en interiores con radón es de $50 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. UNSCEAR
- Fuentes en alimentos y bebidas UNSCEAR estima la dosis efectiva promedio por fuentes naturales tanto en alimentos como en bebidas es de 0,3 mSv.

Las fuentes radiactivas naturales por sus siglas en inglés **Naturally Occurring Radioactive Material (NORM)** (Kathren, 1998) son los radionúclidos que de manera natural están presentes e impactan a todo ser viviente en el planeta, ejemplo de ello los rayos cósmicos, los rayos de la superficie del sol, radionúclidos que se encuentran en la corteza terrestre, en los materiales de construcción en los alimentos que ingiere la población como agua, frutas, etc. Los rayos cósmicos se conocen que son más intensos a altas latitudes, el radón a través de la inhalación, así como sus descendientes contribuyen en gran medida a la dosis que recibe el hombre, la dosis efectiva anual de los rayos cósmicos al nivel del mar es $240 \mu\text{Sv}$. Sobre el nivel del mar Bouville y Lowder (Bouville y Lowder, 1995).

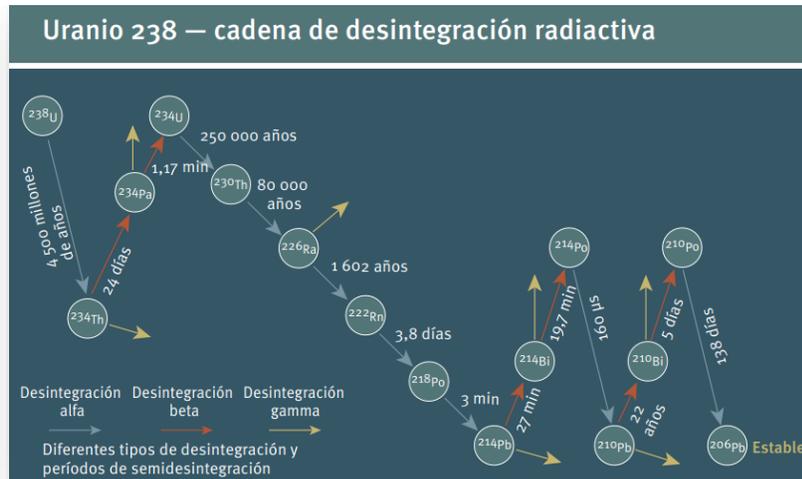
Los NORM minería y procesamiento de minerales, son de los productos industriales en que se hallan estos radionúclidos también ya que contribuyen a la dosis, la producción de fosfatos aplicados en los fertilizantes; la minería de carbón y la generación de energía a partir de la combustión del carbón; la extracción de petróleo y gas; aplicaciones que utilizan radionúclidos de origen natural isotopos de radio y torio. La generación de electricidad mediante energía geotérmica, todos provenientes del tratamiento de agua, (PNUMA, 2016)

Si bien se ha visto que el cálculo de la dosimetría de irradiación interna por los radionúclidos que se encuentran en el aire y que estamos respirando es muy compleja para evaluar el tracto respiratorio para los Radones 220-222, como una mezcla compleja (ICRP,1995) (ICRP,1996)

los radionúclidos que están en el suelo y que también aportan una dosis se han reportado estimando la rapidez de dosis en el aire por unidad de concentración de radionúclidos en el suelo, con modelos matemáticos como Montecarlo, o por la técnica espectral de espectrometría gamma con lo que se ha observado la rapidez de dosis efectiva por unidad de concentración en suelos para potasio 40 de 0.029 a 0.033 nSvh⁻¹ por Bqkg⁻¹, en las series radiactivas de torio 232 de 0.42 a 0.51 nSvh⁻¹ por Bqkg⁻¹ y uranio 238 de 0.30 a 0.35 nSvh⁻¹ por Bqkg⁻¹ (UNSCEAR, 2000)

Teniendo en cuenta que los resultados de los diferentes radionúclidos como el 232Th, 40 K y el 238 U pueden dar sus series, como ejemplo de ellos vemos la Fig.2

Fig.2: Serie de desintegración radiactiva del ^{238}U



(PNUMA, 2016)

En regiones de extracción de petróleo se han llevado a cabo estudios como el que reporta Bassioni en el 2012 como una actividad de monitoreo encontrando radionúclidos naturales en la extracción del mismo, en el bosque como los de Polonia (Dołhańczuk-Śródka, 2012), en España como los que realizó García et al 2007 para monitorear la dosis de irradiación de la población española, en la India usando técnicas de espectrometría gamma para el monitoreo del medio ambiente en muestras de suelo en la región de Malwa (Mehra, 2007).

En china Qu et al estimó las concentraciones de actividad específica de los radionúclidos de ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K en 2300 puntos de muestreo en Qingdao empleando la técnica nuclear de espectrometría gamma, encontrando valores que la hacen habitables. (Qu, 2008).

En el lago Abo Zaabal Egipto, a través de la técnica nuclear de espectrometría gamma, determinaron en suelo plantas y agua valores de concentración de actividad para el ^{238}U 6.57, 10.16 y 5.44 Bq.kg⁻¹, para el ^{232}Th 8.46, 8.33, y 6.04 Bq.kg⁻¹, y para ^{40}K 136.3, 216.8, y 119.2 Bq.kg⁻¹ respectivamente logrando evaluar la dosis y estimando el riesgo de radiación. (Zeinab, 2012)

Radionúclidos NORM fueron determinados en Nigeria en 44 muestras de roca en los estados Ondo y Ekiti para ^{40}K $4.751 \pm 0.091 \text{ Bq.kg}^{-1}$; ^{238}U $13.376 \pm 0.0197 \text{ Bq.kg}^{-1}$; y $3.308 \pm 0.017 \text{ Bq.kg}^{-1}$, obteniendo una concentración de actividad específica baja. (Ajayi, 2001).

Al sur de Vietnam se realizaron estudios de exposición externa en 106 muestras encontrando las siguientes concentraciones de actividad específica ^{226}Ra 28.6 Bq.kg^{-1} , ^{232}Th 50.7 Bq.kg^{-1} , y ^{40}K 292.6 Bq.kg^{-1} , ubicándose dentro de la media mundial. (Huy-Luyen, 2006)

También se han hecho estudios NORM en el estado de Chihuahua, México como el de (Colmenero Sujo ,2016) reportando actividades de ^{238}U 36.8 Bq.kg^{-1} , ^{232}Th 41.4 Bq.kg^{-1} y ^{40}K 805.7 Bq.kg^{-1} algunos superan los valores emitidos por organismos internacionales ICRP, WHO una dosis efectiva anual de 1 mSv/año

Los isotopos radiactivos permanecen en la fase acuosa y se incorporan como precipitados en las rocas o en los sedimentos, radionúclidos algunos radionúclidos de origen natural están presentes en diferentes concentraciones en el agua, ya que depende de factores como los procesos de erosión y disolución algunos de ellos como: ^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra , ^{222}Rn , de abundancia relativa en la corteza terrestre, son los más abundantes en el agua. Y su presencia está sujeta a la solubilidad que poseen (Ivanovich M, Harmon RS, 1992).

La población del planeta según datos del Comité Científico de las Naciones Unidas (UNSCEAR) recibe una dosis per cápita de 2.8072 mSv , de los cuales 2.4 mSv se deben al fondo natural, y de ellos 1.2 son recibidos a través de la inhalación y 0.3 por ingestión como se aprecia en la tabla 1.

Tabla 1. Dosis de radiación promedio de fuentes naturales.

FUENTE	DOSIS EFECTIVA ANUAL PROMEDIO MUNDIAL	RANGO TIPICO (mSv)
Exposición Externa		
Rayos cósmicos	0.4	0.3-1.0
Rayos gamma terrestres	0.5	0.3-0.6
Exposición Interna		
Inhalación (principalmente radón)	1.2	0.2-10
Ingestión	0.3	0.2-0.8
TOTAL	2.4	1-10

(UNSCEAR, 2000).

En Polonia se monitoreo el medio ambiente al sur de Polonia en el bosque Bory Stobrowskie con una superficie de 420 km² obteniendo las concentraciones medias de actividad especifica de ²³⁸U 6.94 Bq.kg⁻¹; ²³²Th 7.86 Bq.kg⁻¹ ; y ⁴⁰K 147.6 Bq.kg⁻¹ encontrándose del orden del promedio mundial UNSCEAR 2000, (Dołhańczuk-Śródka,2012)

Fuentes Artificiales

- Aplicaciones médicas. Como son los procedimientos de intervención, la medicina nuclear y la radioterapia. Otros usos, no incluidos en las investigaciones periódicas de UNSCEAR abarcan los programas de cribado médico y la participación voluntaria en programas de investigación médica, biomédica, diagnóstica o terapéutica
- Reactores nucleares
- Accidentes en instalaciones nucleares
- Aplicaciones industriales determinación de espesores fuentes de Iridio 192 radiografía industrial, irradiadores panorámicos.
- Productos de consumo
- Fuentes huérfanas

Estas fuentes de radiación naturales y artificiales poseen una dosis con la que contribuyen al ser humano como se observa en la Fig.3.

Fig. 3 Distribución mundial de Exposiciones a fuentes naturales y artificiales



4.3 Los Efectos Biológicos

Los efectos biológicos que se originan por la exposición y/o irradiación a las fuentes que generan radiación ionizante y no ionizante están bien estudiados, (Zhang et al ,2012) (Karagas et al,2002).

La clasificación de los efectos biológicos se puede realizar de dos formas, la primera en función del tipo de células afectadas denominándose efectos somáticos y hereditarios las células somáticas son las que forman los tejidos, este tipo de efecto se presenta solamente en el individuo que fue irradiado y va desde la disminución de células en la medula ósea hasta la muerte. Y los efectos hereditarios son resultado de lesiones en el material genético de las células germinales, con cambios en la información genética en la descendencia. (UNSCEAR, 1994).

La segunda forma por la probabilidad de aparición los efectos biológicos pueden clasificarse en estocásticos y deterministas la exposición a la radiación puede producir efectos que se manifiestan después de un tiempo y que solamente pueden ser detectados en una población epidemiológicamente para este efecto no existe un nivel umbral. Se puede determinar la probabilidad de ocurrencia, un ejemplo de ello las aberraciones cromosómicas y el cáncer. Para los determinísticos son consecuencia de una muerte de una cantidad elevada de células, el daño está en función de la dosis recibida. un ejemplo de ello el síndrome agudo de radiación.

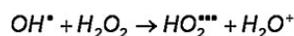
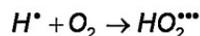
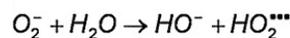
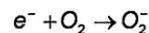
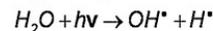
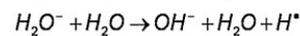
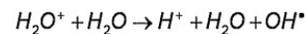
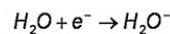
Para hablar de las dosis equivalentes y las dosis efectivas que recibe la población y personal que está en contacto con las fuentes de radiación ionizante primero debemos definir qué significa equivalente de dosis con fines de protección radiológica se ha encontrado conveniente introducir una magnitud física que correlaciona la dosis absorbida con los efectos deletéreos más importantes de la exposición a la radiación, en particular con los efectos estocásticos tardíos.

El equivalente de dosis es la cantidad que resulta de la ecuación: $H = DQN$, donde D es la dosis absorbida en Gy, Q es el factor de calidad y N es el producto de todos los demás factores modificantes, tomándose por ahora un valor para N igual a la unidad. El nombre especial para la unidad de equivalente de dosis es el sievert (Sv). El rem puede ser usado temporalmente. (reglamento de seguridad radiológica ,2018)

Entre las lesiones que se producen por la interacción de la radiación ionizante están las relacionadas con las células y macromoléculas del ADN, o bien con otras estructuras celulares como las mitocondrias. (Leitão,1994) (UNSCEAR,1994) y (ICRP,1992) membrana plasmática, etc. Como son daños en la replicación y preservación de la información genética dependiendo de la cantidad de radiación, del tipo de radiación y del tejido u órgano en que se deposite la energía como se

ha estudiado en la Radiobiología que es una rama de la biología que estudia los efectos biológicos que producen los parámetros de las radiaciones ionizantes y la magnitud del daño, que se genera. (Azvolinsky,2012) (Hall,2012). El resultado de las reacciones con la presencia de oxígeno o de la interacción de los electrones por efectos secundarios con el agua principal componente de las células genera iones oxhidrilo o peróxidos dependiendo de la presencia del mismo como se representa en la figura 4.

Fig. 4 Productos de radiolisis



(Puerta-Ortiz y Morales-Aramburo, 2021)

Cuanto mayor es la transferencia lineal de energía LET ocasionada por partículas cargadas como las alfa y beta mayor es la ruptura o efecto en las hélices del ADN ocasionando fracturas dobles la mayor parte es por fracturas simples en el ADN como es el caso de LET pequeños ocasionados por la interacción de la radiación gamma. (UNSCEAR, 1994 y AIEA,1986).

4.4 Criterios Radiológicos

Los criterios radiológicos de la Organización mundial de salud nos indica lo siguiente (WHO,2021):

- Maneja un criterio de dosis individual (IDC) de 0.1 mSv/año consumo de agua

potable.

- El diagnóstico inicial se realiza tanto para la concentración de actividad alfa y beta global. Si las concentraciones de actividad medidas están por debajo de los niveles de $0,5 \text{ BqL}^{-1}$ para la concentración de actividad alfa global y 1 BqL^{-1} para la concentración de actividad beta global, no se requiere ninguna otra acción.
- Si se supera alguno de los niveles del diagnóstico cribado, se deben determinar las concentraciones de radionúclidos individuales y compararlas con los niveles de orientación.
- El resultado de esta evaluación adicional podrá indicar que no es necesario adoptar ninguna medida o que es necesaria una evaluación adicional antes de poder tomar una decisión sobre la necesidad de medidas para reducir las dosis.

En México los criterios radiológicos se han establecido en las normas oficiales mexicanas NOM-127-SSA1-2021 Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización, ver Tabla 2, y la NOM-201-SSA1-2015, Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias. Teniendo los siguientes criterios radiológicos. Ver Tabla 3.

Tabla 2.: Especificaciones Sanitarias para radiactividad NOM-127-SSA1-2021

Parámetros	Límite permisible	Unidades
Radiactividad alfa total	0.5	Bq/L
Radiactividad beta total	1.0	Bq/L

Tabla 3.: Especificación Sanitaria para Radiactividad NOM-201-SSA1-2015

ESPECIFICACIÓN.	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE (Bq/L).
Radiactividad beta total	1,85
Radiactividad alfa total	0,56

En la Directiva de Agua Potable de la Comisión Europea (Comisión Europea, 2001), este parámetro es llamada dosis indicativa total (TID), y se adopta el mismo valor de 0,1 mSv/año así mismo los límites de detección y métodos de análisis ver Tabla 4.

Tabla. 4: Métodos para el análisis alfa beta total en agua potable.

Método/Referencia	Técnica	Límite de detección	Aplicación
ISO Organización internacional de estandarización		0.02-0.1 Bq/L	Agua subterránea con TDS menor a 0.1 g/L
ISO 9696 PARA ALFA TOTAL ISO 2017 ISO 9697 PARA BETA TOTAL ISO 2017	Evaporación Evaporación		Radionúclidos no volátiles
ISO 10704 PARA ALFA Y BETA TOTAL ISO 2019b POR CAPA ISO 11704 PARA ALFA Y BETA TOTAL POR CENTELLEO LIQUIDO ISO 2018b	Evaporación o Coprecipitación Ninguno		Agua con TDS menor a 5 g/L
Asociación americana de salud pública APHA et al 2005	coprecipitación	0.02 Bq/L	Agua superficial y agua subterránea TDS no es un factor

(WHO, 2021)

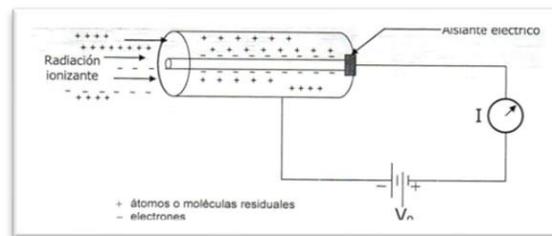
4.5 Los métodos de determinación de actividad alfa y beta global

Los métodos de determinación en este estudio son los contadores proporcionales de flujo de gas P10 (GFPC) son importantes ya que sirven como un tamizaje para

contrastar con los niveles de referencia de las distintas normas aplicables en la materia y tomar acciones para evitar efectos deletéreos en la salud de la población que la ingiere. (ISO10704).

Los contadores proporcionales de gas son utilizados habitualmente para determinar actividad alfa total y beta total pero antes explicamos el funcionamiento de un detector de gas, estos detectores basan su funcionamiento en lo siguiente al aplicar una diferencia de potencial entre dos electrodos en un gas a cierta presión contenido en un recipiente adecuado, una respuesta por la incidencia de la radiación con el gas de forma directa o indirecta genera ionización misma que al colectarse podemos estimar la cantidad de radiación que se produce por tal interacción, ver Fig.5 (ININ,2018)

Fig.5: Principio de funcionamiento de un detector gaseoso.



(ININ, 2018)

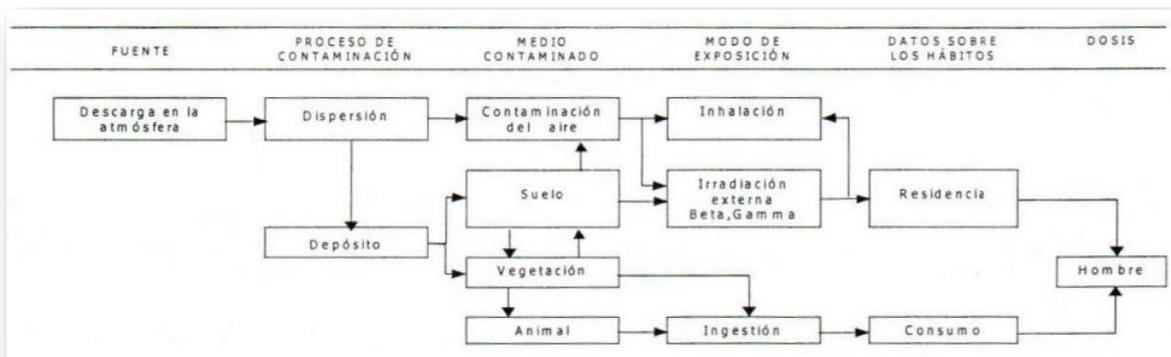
A medida que se incrementa la diferencia de potencial se generan iones secundarios como producto de los iones primarios y la cantidad de carga total será proporcional a la energía depositada teniendo alturas de pulsos diferentes diferenciándose las partículas alfa y las betas de ahí la importancia de utilizar esta técnica de detección nuclear, con detectores proporcionales de flujo de gas.

4.6 Rutas de exposición

Las rutas o vías de exposición presentan interacciones aquí presento las mismas a continuación: (reporte técnico 295)(ININ 2018) Fig.6 y Fig.7.

- Aire Exposición Externa. Los radionúclidos que se encuentran en el efluente y genera exposición externa en los individuos.
- Aire Exposición Interna. Los radionúclidos suspendidos en el aire son respirados por el individuo inmerso en la nube radiactiva.
- Aire (Depósito) Exposición Externa las partículas radiactivas se depositan en el suelo
- Deposito en Vegetales e Ingestión por el hombre Irradiación Interna: Los efluentes aéreos al ser liberados en la atmosfera pueden alcanzar la superficie en el suelo y depositarse sobre el o sobre los vegetales.
- Depósito en Plantas Forrajeras, Ingestión por animales, Ingestión por el Hombre de Productos animales Irradiación Interna. Los Radionúclidos liberados en partículas lo que contribuyen son los de vida media larga.
- Contaminación de Aguas Superficiales Subterráneas, Ingestión de Agua contaminada Ingestión de alimentos Irradiados con Agua contaminada Irradiación interna.
- Cuerpos de agua que por arrastre contaminan los depósitos, pozos, manantiales.

Fig. 6: Vías atmosféricas que conducen a la exposición humana.



(ININ, 2018)

Fig. 7: Vías acuáticas que conducen a la exposición humana.



(ININ, 2018)

5. HIPOTESIS

Ho: El agua que consume la población de las zonas rurales del centro del Estado de Veracruz en la época de secas y lluvias no contiene una concentración de actividad alfa de 0.5 BqL^{-1} y beta de 1.0 BqL^{-1} de acuerdo con la modificación de NOM-127-SSA1-1994 Atendiendo que en ambos casos el tipo de suelo del que se extrae sean pozos, manantiales y acuíferos.

6. OBJETIVOS

6.1.-OBJETIVO GENERAL

Presentar un estudio radiológico de agua de uso y consumo humano en zonas rurales, para inferir el nivel de concentración radiológica por radiactividad alfa y beta global del Centro del Estado de Veracruz.

6.2.-OBJETIVOS PARTICULARES

Seleccionar una estrategia de análisis factorial de 2x2 para el muestreo y análisis de resultados.

Estimar el contenido de radiación alfa y beta global en las muestras de agua de la región Central de Veracruz en estadios de sequías y lluvias a través de técnicas de radiación validadas

Realizar el análisis estadístico utilizando una prueba ANOVA a los resultados en la concentración alfa y beta.

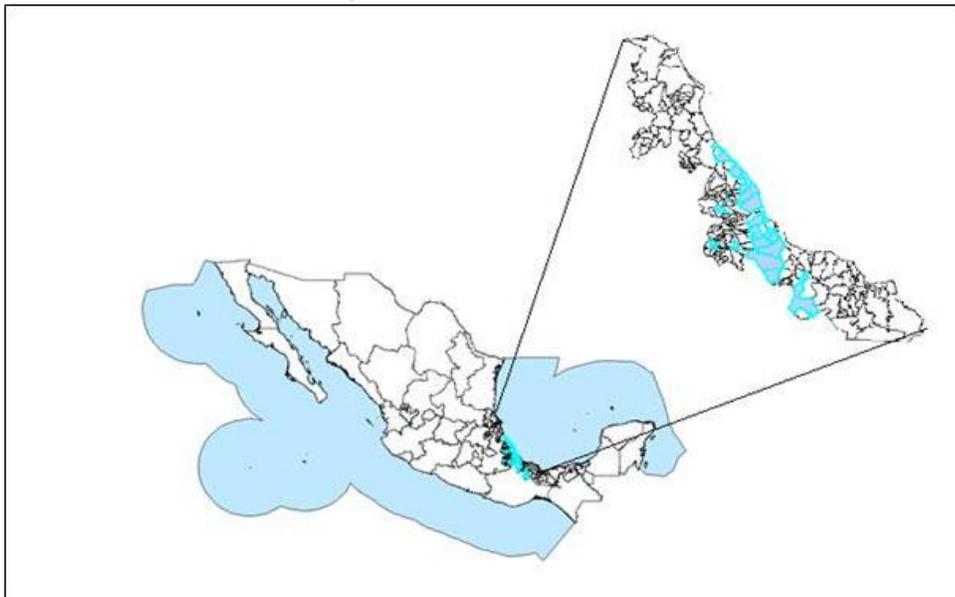
Estimar la dosis a la población en las zonas rurales cuya concentración de actividad sea superior a la norma establecida.

7. MATERIAL Y MÉTODOS

7.1 Área de estudio y muestreo de agua.

El estado de Veracruz mide aproximadamente 71,826 Km² y tiene una población de aproximadamente 8 062 579 al 2020 (INEGI,2020). Las muestras fueron recolectadas en las zonas rurales de la parte central del estado de Veracruz, se registró un total de 195 muestras en 22 municipios ver figura 8, en época de secas y de lluvias teniendo en cuenta para ello los diferentes tipos de suelo que cuenta el estado en la parte central dado que Veracruz es un estado con una gran diversidad edafológicamente hablando teniendo desde planicies costeras hasta montañas significativas, para ello se tomó su ubicación con un GPS Geo posición App.,

Fig. 8: Ubicación de los municipios en donde se colectaron las muestras



Fuente: Propia,2022

7.2 Toma de muestras

El agua se colectó de fuentes de abastecimiento como acuíferos, manantiales, pozos. Se colectaron de diferentes tipos de suelo ya que se seleccionaron de suelos como son los (CH) Chernozem, (AC) Acrisol, (AR) Arenosol, (VR) Vertisol, (PH) Phaeozon, (LV) Luvisol cubriendo estos tipos de suelo un 60.63 % de tipos de suelo del estado de Veracruz y Se empleó recipientes de plástico de 3.7 L con tapa y contratapa previamente lavados y enjuagados con agua destilada, y secos. Se dejó correr el agua el tiempo suficiente para que la muestra no provenga de agua estancada. No se adicionó ningún reactivo para conservación o acondicionamiento de la muestra. Cada muestra se etiquetó apropiadamente y no se acidificó ya que su análisis radiológico no excedió más de 7 días naturales desde la toma hasta la recepción de la muestra en el Laboratorio Estatal de Salud Pública de Veracruz.

7.3 Método de prueba

Se utilizó métodos validados y autorizados por la CCAYAC se mide la conductividad; con este valor se determina el volumen que se va a utilizar, con el fin de controlar el espesor másico (para cada 20 cm² de área de conteo, se adiciona solución indicadora de naranja de metilo al 0.05% y se acidifica a pH 4 con ácido nítrico 1N o al vire de color (naranja a amarillo canela).

La muestra se evapora, sin llegar a la ebullición para reducir el volumen hasta un mínimo sin alcanzar la cristalización. Pesar una plancheta metálica acanalada. Transferir la muestra en pequeñas porciones sobre la plancheta acanalada y evaporar hasta sequedad sin hervir, evitando que se quemen los sólidos.

Completar el secado en estufa a 65±5 °C y enfriar en un desecador. Obtener el peso del residuo seco y su espesor másico. Se lee en el sistema proporcional de flujo. Hacer los cálculos para calcular la actividad alfa y beta global reportar como

BqL⁻¹.

7.4 Determinación de actividades alfa y beta global por un Contador Proporcional de Flujo de Gas (GFPC).

Las mediciones de la actividad alfa global y beta global, llamadas método de depósito de fuente delgada, se realizaron como primer paso en la caracterización radiológica de las muestras de agua, y este método incluye los estándares.

El procedimiento está autorizado por la COFEPRIS. Mediante oficio No.CAS/TA/08/2021. Para los análisis de alfa global y beta global, se evaporaron dependiendo a la conductividad presentada por cada muestra como mínimo 50 ml y como máximo un litro sin hervir a ≤ 90 °C (asegurando depósitos con un espesor másico inferior a $1,48E-2$ g.cm⁻²). El residuo obtenido se transfirió a una plancheta de acero inoxidable (2 pulgadas de diámetro y 1/8 de pulgada de profundidad). Cada plancheta se midió para la actividad alfa total y beta total durante un intervalo de 60 o 120 minutos por muestra dependiendo de la conductividad de las muestras en el Laboratorio Estatal de Salud Pública del Estado de Veracruz utilizando un Canberra Tenelec de bajo fondo, el tipo de detector fue un contador proporcional de flujo de gas ((GFPC) con una mezcla de 90% de argón y 10% de metano (P-10) y un transporte automático de 50 muestras. El alto voltaje de funcionamiento del detector se estableció en 1425 V. El fondo de cada detector se determinó contando planchetas vacías y blancos de reactivos durante 60 minutos y 120 minutos.

Los detectores se calibraron en 2020 para la eficiencia alfa y beta utilizando fuentes de solución estándar Am-241 (11.0 Bq \pm 1.44%) y Sr-90 / Y-90 (16.3 Bq \pm 1.25%), que fueron adquiridas a la compañía Eckert & Zeigler trazables a NIST.

La eficiencia alfa global fue de $0,0405 \pm 7,5$ % a $0,1740 \pm 4,9$ %, con un espesor másico ($3,07 e^{-3}$ - $1,48 e^{-2}$ g/cm²) y un modelo matemático $E_f = 0,287 \text{ EXP}(-139m)$

donde m es el espesor másico del depósito ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) mientras que la eficiencia beta global fue de $0,3140 \pm 3,4\%$. a $0,3909 \pm 3,5\%$, con un espesor másico ($3,03 \text{ e}^{-3} - 1,26 \text{ e}^{-2} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$) y un modelo matemático $E_f=0,416 \text{ EXP}(-17,4 m)$ donde m es el espesor másico del depósito ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Las siete soluciones se prepararon con el mismo procedimiento de preparación de muestras analizadas; sus residuos fueron depositados en una plancheta y fueron contados en el equipo Canberra Tennelec.

Las concentraciones globales de actividad alfa y beta se pueden obtener de la siguiente manera:

$$A = \frac{cpmt - cpmf}{E_f * V * 60} \quad (1)$$

Donde A es la concentración global de actividad alfa o la concentración de actividad beta de la muestra (BqL^{-1}); $cpmt$ es el recuento total de la muestra (alfa o beta); $cpmf$ son los recuentos de fondo (alfa o beta); E_f es la eficiencia del conteo (alfa o beta); V es el volumen de la muestra (L); 60 es la conversión a Becquerel a desintegraciones por minuto;

la concentración mínima detectable (MDC) para la concentración global de actividad alfa o beta global se calcula como sigue (Currie, 1968):

$$\text{MDC} = \frac{4.66 \sigma cpmf}{E_f * V * 60} \quad (2)$$

$\sigma cpmf$ incertidumbre de fondo (alfa o beta).

7.5 Estimación de la dosis efectiva anual

La dosis efectiva anual (DEA) asociada al uso y consumo humano en específico a la ingestión de agua con una concentración de actividad alfa y beta global se estimó para evaluar los riesgos a la salud de adultos del público utilizando la siguiente ecuación:

$$DEA = A_{\alpha/\beta} * V_w * Q \quad 3)$$

donde $A_{\alpha/\beta}$ es la concentración de actividad alfa/beta global de la muestra ($Bq L^{-1}$); La Q es el coeficiente de dosis relacionado a la ingesta dependiente de la edad ($mSv Bq^{-1}$); V_w es el volumen de ingesta anual de agua por año, en este trabajo, $V_w = 730 (L \text{ año}^{-1})$ según la OMS y el OIEA, para una persona adulta y Q, los valores para los principales radionúclidos fueron $Q_{Po-210} = 1,2 \times 10^{-3} mSv Bq^{-1}$; $Q_{Ra-226} = 2,8 \times 10^{-4} mSv Bq^{-1}$; $Q_{Pb-210} = 6,9 \times 10^{-4} mSv Bq^{-1}$ y $Q_{Ra-228} = 6,9 \times 10^{-4} mSv Bq^{-1}$. (ICRP 60).

Los criterios radiológicos para la calidad del agua en México los estableció la Secretaría de Salud en la normatividad modificación a la NOM-127-SSA1-1994, y NOM -201-SSA1-2015 publicados en el diario oficial de la federación. Además, las concentraciones máximas de actividad admitidas son de $0.5 Bq L^{-1}$ para el alfa global y $1.0 Bq L^{-1}$ para la beta global. Según la OMS y el OIEA. Sin embargo, el valor de dosis efectivo anual es como el establecido de $0.1 mSv y^{-1}$ y que es similar al valor recomendado por la Organización mundial de la salud, WHO.

El monitoreo de contaminantes radiológicos artificiales se ha establecido por diferentes legislaciones como una premisa dado el interés de los ciudadanos por las actividades humanas y los accidentes que se han dado como Chernobyl , Fukushima, Three Mile Island, la importancia de monitorear radiológicamente el agua y los alimentos que consume la población, en el continente americano tiene predominio los límites del OIEA, las consideraciones de las naciones unidas y la Environmental Protection Agency (EPA).

Desde 1976 a la fecha la EPA ha realizado una serie de acciones de vigilancia en agua de consumo humano, transformando sus criterios en base a resultados y efectos advertidos en la salud. Así en 1986 se introduce el concepto de "Límite de Contaminación Meta Máximo (MCLG), describiéndolo como lo deseable para

eliminar cualquier riesgo a la salud, conservando el concepto de “Límite de Contaminación Máximo “(MCL) referido a aquel límite que es tolerable o que es realmente alcanzable, tomando en cuenta las condiciones tecnológicas del momento para el tratamiento y suministro de esa agua, sin que elimine totalmente el riesgo asociado.

En la tabla 5, se muestran las acciones de vigilancia de la EPA (1986); como se aprecia de las unidades de los MCL, se refieren en actividad específica (concentración) para emisores alfa y el radio, en unidades de dosis para los emisores beta y fotones y, también en concentración de masa por unidad de volumen para el uranio, en función de contemplar no solo su riesgo radiológico sino incluir también el riesgo toxicológico de este elemento para provocar daño al riñón, estos valores se emplearon para la modificación de la norma 127 - SSA1-1994.

Tabla 5.: Acciones de Vigilancia de la EPA (1986)

Contaminante	MCL	Efecto Potencial a la Salud por Ingestión de Agua	Fuentes de Contaminación en agua de Consumo Humano
Partículas alfa	0.555 Bq/L	Incrementa el riesgo de cáncer	Erosión de depósitos naturales de ciertos minerales que son radiactivos y pueden emitir alfas
Radio-226 y Radio-228	0.185 Bq/L	Incrementa el riesgo de cáncer	Erosión de depósitos naturales
Partículas beta y emisores de fotones	4 mrem por año, equivalente a 0.04 mSv por año	Incrementa el riesgo de cáncer	Depósitos de elementos radiactivos artificiales y decaimiento de los radionúclidos de depósitos naturales por emisión de betas.
Uranio	30 µg / L	Incrementa el riesgo de cáncer	Erosión de depósitos naturales

En el 2004 la OMS propone un método de indicadores, donde se establecen valores límites para la toma de decisiones. También como indicadores a las

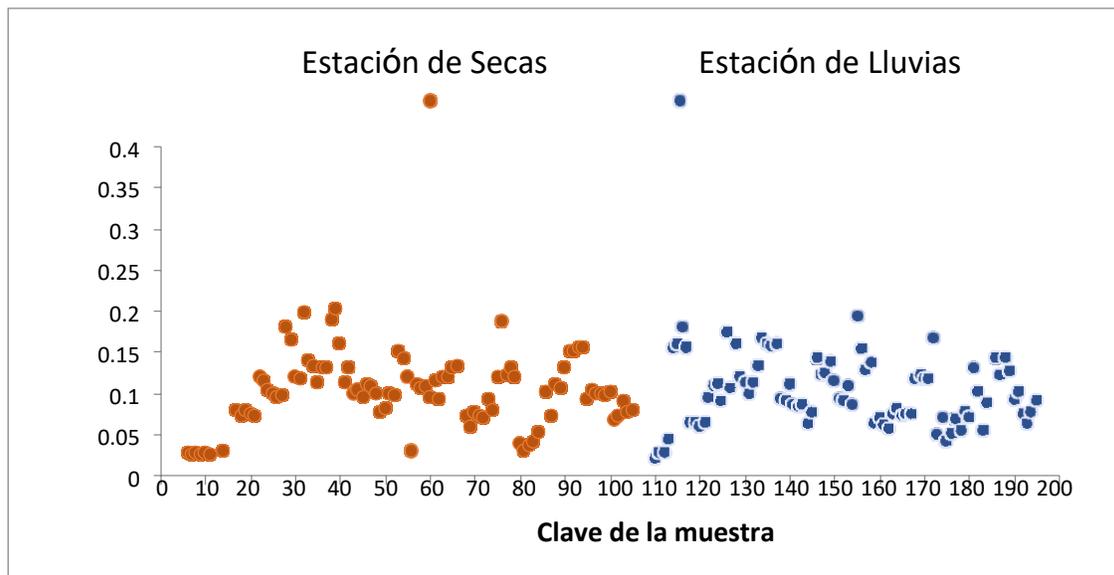
partículas alfa y betas totales, las cuales se determinan sin conocer la identidad específica de los radionúclidos que la provocan. Propone como valor para alfa total 0.5 Bq/L, y 1.0 Bq/L para la actividad beta total, tomando en consideración los radionúclidos críticos que pueden ser responsables de esto, así como no rebasar 0.1 mSv/año. Propone además como estrategia, considerar si cualquiera de los dos valores es rebasado, el identificar los radionúclidos que la provocan, estimar las dosis parciales y la integrada.

8. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Las concentraciones mínimas detectables de alfa y beta global, fueron calculados de acuerdo a la ecuación 2, las concentraciones mínimas detectables para alfa global se encontró en un rango de 0.025-0.202 con un valor promedio de 0.1009 BqL-1 para el estadio de secas figura. 9 y para el estadio de lluvias en un rango de 0.022-0.193 con un valor promedio de 0.1008 BqL-1 ver figura 10.

La prueba estadística de comparación de medias (t-test) reporta que no existe diferencia significativa ($p > 0.05$) entre las MDCs de actividad alfa en las muestras de agua en las estaciones de secas y de lluvias.

Fig. 9: Concentración mínima detectable alfa para los estadios de secas y lluvias.

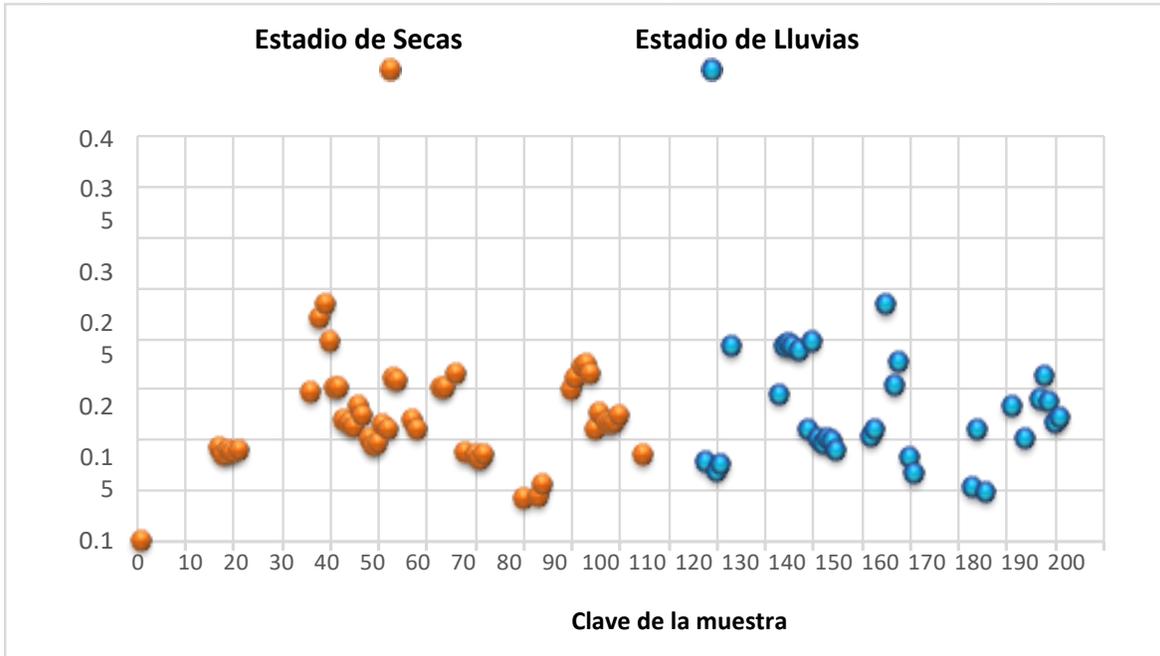


Fuente: Propia,2022

La MDC de la concentración beta global para el estadio de secas fue de 0.042-0.232 con un valor promedio de 0.1226 BqL-1y para el estadio de lluvias en un rango de 0.049-0.232 con un valor promedio de 0.1262 BqL-1. figura 8 los valores

medios de las concentraciones mínimas detectables para el agua muestreada en estadios de secas y lluvias para alfa y beta global son del orden. La prueba estadística de comparación de medias (t-test) reporta que no existe diferencia significativa ($p > 0.05$) entre las MDCs de actividad beta en las muestras de agua en las estaciones de secas y de lluvias.

Fig. 10 Concentración mínima detectable beta para los estadios de secas y lluvias.



Fuente: Propia, 2022

Determinación de las concentraciones de actividad alfa y beta global

En las muestras de agua en las estaciones de secas y de lluvias de las 195 muestras analizadas, 16 muestras alcanzaron superar la MDC_{α} ; en la estación de secas solo 11 muestras presentan una concentración de actividad alfa superior a la MDC_{α} y 5 muestras presentan una concentración de actividad alfa superior a la MDC_{α} en la estación de lluvias; 115 muestras registraron una concentración de actividad beta superior a la MDC_{β} , de las cuales 58 muestras presentan una concentración de actividad beta superior a la MDC_{β} en el estadio de secas y 57 muestras presentan una concentración de actividad beta superior a la MDC_{β} en el

estadio de lluvias.

La tabla 6 presenta los valores de concentración de actividad alfa y beta global en los estadios de secas y de lluvias, se presenta los valores medios, así como el rango y las concentraciones mínimas detectables, los valores medios de concentración de actividad alfa en el estadio de secas es de $0.2409 \pm 0.0986 \text{ BqL}^{-1}$; con un rango de $0.055\text{-}0.91 \text{ BqL}^{-1}$ y para la concentración de actividad beta global fue de $0.4208 \pm 0.1149 \text{ BqL}^{-1}$ con un rango de $0.034\text{-}1.41 \text{ BqL}^{-1}$, en cuanto a los estadios de lluvias los valores medios de la concentración de actividad alfa global fueron de $0.5102 \pm 0.1038 \text{ BqL}^{-1}$ con un rango de $0.052\text{-}0.95 \text{ BqL}^{-1}$, y para la media de concentración de actividad beta global fue de $0.3563 \pm 0.1008 \text{ BqL}^{-1}$, con un rango de $0.025\text{-}0.25 \text{ BqL}^{-1}$. La realización de la prueba estadística de (t-test) comparando las concentraciones de actividad alfa y beta global en los estadios de secas y de lluvias no presentan una diferencia significativa a un valor de ($p > 0.05$).

Si bien los resultados de concentración de actividad alfa global en las muestras de agua colectadas en el municipio de Alto Lucero de Gutiérrez Barrios corresponde un 56.25 % de las muestras que se registran con una concentración de actividad alfa global en todo el muestreo, un 45.45 % de las muestras en el estadio de secas se registran en esta localidad y alcanza un 80 % de las muestras con una concentración de actividad alfa global en el estadio de lluvias, se reporta una concentración de actividad alfa global de 0.95 BqL^{-1} en el estadio de lluvias como un máximo alcanzado por lo que se debe considerar medidas a tomar en esta localidad, así como también llevar un monitoreo a los municipios de Nautla y Tecolutla que alcanzaron valores de interés.

También se observa que ninguna muestra colectada en los estadios de secas y de lluvia en este estudio alcanza el límite establecido por la normatividad mexicana de 1.85 BqL^{-1} . Anterior al 2021.



Tabla 6 Resultados de concentración de actividad en estadios de secas y de lluvias

Estación de Secas					Estación de Lluvias				
Clave de muestra	Alfa Total		Beta Total		Clave de muestra	Alfa Total		Beta Total	
	A_{α}	ΔA_{α}	A_{β}	ΔA_{β}		A_{α}	ΔA_{α}	A_{β}	ΔA_{β}
1	0.91	0.27	0.8	0.14	106	0.68	0.14	0.73	0.14
2	0.53	0.11	0.69	0.13	107	0.95	0.11	0.79	0.15
3	0.18	0.1	0.41	0.11	108	0.199	0.099	0.72	0.15
4	0.32	0.14	0.64	0.14	109	0.67	0.14	0.78	0.14
5	0.149	0.093	0.44	0.12	110	<0.022		0.11	0.025
6	<0.028		0.086	0.024	111	<0.027		0.11	0.026
7	<0.026		0.098	0.025	112	<0.027		0.081	0.026
8	<0.027		0.053	0.022	113	<0.043		0.064	0.036
9	<0.025		0.084	0.023	114	<0.155		0.64	0.18
10	<0.027		0.098	0.024	115	<0.161		0.46	0.17
11	<0.026		0.056	0.021	116	<0.180		0.54	0.21
12	0.055	0.039	1.32	0.3	117	<0.156		0.48	0.16
13	0.095	0.048	1.39	0.3	118	<0.064		<0.078	
14	<0.030		1.41	0.32	119	<0.064		0.101	0.054
15	0.064	0.033	0.96	0.27	120	<0.060		<0.069	
16	0.069	0.032	1.11	0.28	121	<0.063		<0.076	
17	<0.079		<0.091		122	<0.095		0.237	0.088
18	<0.073		<0.085		123	<0.109		<0.191	
19	<0.079		<0.090		124	<0.111		0.143	0.084
20	<0.075		<0.087		125	<0.090		0.147	0.066
21	<0.073		<0.089		126	<0.174		1.35	0.24
22	< 0.12		0.137	0.081	127	<0.106		1.3	0.17
23	<0.115		0.151	0.084	128	<0.161		1.14	0.25
24	<0.103		0.183	0.086	129	<0.119		1.48	0.19
25	<0.100		0.138	0.08	130	<0.114		0.203	0.093
26	<0.094		0.122	0.075	131	<0.099		0.161	0.084
27	<0.097		0.184	0.081	132	<0.114		0.35	0.11
28	< 0.18		1.32	0.22	133	<0.134		<0.145	
29	<0.164		1.35	0.24	134	<0.166		<0.192	
30	<0.119		1.4	0.18	135	<0.160		<0.194	
31	<0.117		1.29	0.18	136	<0.158		<0.191	
32	<0.199		1.16	0.23	137	<0.161		<0.188	
33	< 0.14		0.18	0.1	138	<0.092		0.175	0.082
34	<0.134		0.145	0.098	139	<0.091		<0.110	
35	<0.112		0.154	0.092	140	<0.110		<0.196	
36	<0.130		<0.147		141	<0.087		<0.101	
37	<0.130		0.21	0.11	142	<0.084		<0.097	



Estación de Secas					Estación de Lluvias				
Clave de muestra	Alfa Total		Beta Total		Clave de muestra	Alfa Total		Beta Total	
	A_{α}	ΔA_{α}	A_{β}	ΔA_{β}		A_{α}	ΔA_{α}	A_{β}	ΔA_{β}
38	< 0.19		< 0.22		143	<0.086		<0.100	
39	<0.202		<0.232		144	<0.064		<0.099	
40	<0.161		<0.197		145	<0.078		<0.090	
41	<0.113		<0.150		146	<0.142		0.2	0.13
42	<0.132		<0.151		147	<0.121		0.18	0.1
43	< 0.10		< 0.12		148	<0.124		0.15	0.1
44	<0.104		<0.118		149	<0.138		0.24	0.11
45	<0.095		<0.113		150	<0.115		0.179	0.088
46	<0.111		<0.132		151	<0.093		0.143	0.076
47	<0.108		<0.123		152	<0.090		<0.104	
48	<0.099		< 0.10		153	<0.108		<0.111	
49	<0.078		<0.094		154	<0.086		0.102	0.061
50	<0.082		<0.097		155	<0.193		<0.232	
51	<0.099		<0.114		156	<0.154		0.23	0.13
52	<0.098		<0.109		157	<0.128		<0.154	
53	< 0.15		< 0.16		158	<0.138		<0.176	
54	<0.142		<0.158		159	<0.064		0.09	0.056
55	<0.120		0.29	0.12	160	<0.070		<0.082	
56	<0.030		0.46	0.13	161	<0.062		<0.068	
57	< 0.11		< 0.12		162	<0.057		0.109	0.054
58	<0.106		<0.110		163	<0.074		0.179	0.068
59	<0.109		0.129	0.082	164	<0.082		0.123	0.069
60	<0.096		0.161	0.078	165	<0.073		0.158	0.059
61	<0.115		0.124	0.081	166	<0.074		0.142	0.057
62	<0.092		0.117	0.076	167	<0.074		0.146	0.058
63	< 0.12		< 0.15		168	<0.117		0.4	0.12
64	<0.12		<0.15		169	<0.121		0.36	0.12
65	<0.131		0.29	0.12	170	<0.118		0.51	0.13
66	<0.133		<0.165		171	<0.117		0.34	0.11
67	0.16	0.13	0.26	0.13	172	<0.166		0.38	0.14
68	<0.073		<0.087		173	<0.049		<0.054	
69	<0.060		0.083	0.052	174	<0.070		<0.111	
70	<0.076		<0.085		175	<0.041		0.057	0.034
71	<0.072		<0.081		176	<0.049		<0.049	
72	<0.070		<0.086		177	<0.069		0.364	0.079
73	<0.093		0.138	0.071	178	<0.054		0.334	0.071
74	<0.079		0.146	0.069	179	<0.076		0.389	0.081
75	< 0.12		0.38	0.12	180	<0.071		0.426	0.087
76	<0.188		0.37	0.17	181	<0.130		<0.132	

Estación de Secas					Estación de Lluvias				
Clave de muestra	Alfa Total		Beta Total		Clave de muestra	Alfa Total		Beta Total	
	A_{α}	ΔA_{α}	A_{β}	ΔA_{β}		A_{α}	ΔA_{α}	A_{β}	ΔA_{β}
77	<0.121		0.34	0.12	182	<0.101		0.142	0.084
78	<0.132		0.38	0.13	183	<0.055		0.12	0.05
79	<0.120		0.3	0.11	184	<0.088		<0.101	
80	<0.039		<0.042		185	0.052	0.03	0.94	0.17
81	<0.031		0.034	0.024	186	<0.142		0.23	0.12
82	<0.036		0.046	0.026	187	<0.123		<0.139	
83	<0.042		<0.044		188	<0.143		<0.162	
84	<0.053		<0.055		189	<0.126		<0.137	
85	0.118	0.09	0.56	0.12	190	<0.092		<0.117	
86	<0.102		0.59	0.12	191	<0.102		<0.127	
87	<0.073		0.297	0.08	192	<0.075		0.164	0.065
88	<0.11		0.149	0.084	193	<0.064		0.153	0.059
89	<0.106		0.203	0.092	194	<0.077		0.161	0.067
90	<0.130		<0.149		195	<0.090		0.177	0.075
91	<0.15		<0.16						
92	<0.152		<0.171						
93	<0.156		<0.174						
94	<0.155		<0.165						
95	<0.092		<0.11						
96	<0.104		<0.125						
97	<0.100		<0.117						
98	<0.099		<0.116						
99	<0.098		<0.117						
100	<0.101		<0.124						
101	<0.067		0.174	0.062					
102	<0.072		0.218	0.067					
103	<0.090		0.123	0.066					
104	<0.078		0.276	0.08					
105	<0.080		<0.085						
Promedio	0.2409	0.0986	0.4208	0.1149	Promedio	0.5102	0.1038	0.3563	0.1008
Rango	0.055- 0.91	0.032- 0.27	0.034- 1.41	0.021- 0.32	Rango	0.052- 0.95	0.03- 0.14	0.057- 1.48	0.025- 0.25

Se tienen registrados los valores medios de los diferentes sitios de muestreo en los municipios como se aprecia en la tabla 7 y 8. Así también una comparación con valores de otros estudios en diferentes países. Tabla 9

Determinación de la concentración de actividad alfa y beta global.

Tabla 7: Valores medios de Concentración de Actividad Alfa y Beta Global en Secas

MUNICIPIO	UBICACIÓN		PROMEDIO ALFA	BETA
ALTO LUCERO DE GUTIERREZ BARRIOS	19.70641	-96.43159	0.418	0.596
BANDERILLA	19.58988	-96.94425	0.027	0.079
TECOLUTLA	20.25037	-96.94425	0.063	1.238
CAMERINO Z. MENDOZA	18.79346	-97.19874	0.076	0.088
COTAXTLA	18.82034	-96.34871	0.105	0.153
NAUTLA	20.15704	-96.71706	0.156	1.304
JAMAPA	19.03812	-96.22573	0.129	0.167
ACTOPAN	19.69853	-96.41605	0.160	0.190
VEGA DE ALATORRE	19.96973	-96.60164	0.104	0.121
JUCHIQUE DE FERRER	19.79197	-96.67081	0.091	0.103
LA ANTIGUA	19.36506	-96.36894	0.111	0.267
MEDELLIN	19.01771	-96.13743	0.105	0.127
NOGALES	18.82071	-97.16451	0.133	0.203
ORIZABA	18.86339	-97.07618	0.070	0.084
PASO DE OVEJAS	19.303	-96.439	0.086	0.142
TLALIXCOYAN	18.7439	-96.1375	0.136	0.354
JUCHIQUE DE FERRER	19.76176	-96.67541	0.040	0.044
PLAYA VICENTE	17.83254	-95.81519	0.098	0.482
SOLEDAD DE DOBLADO	19.04594	-96.42056	0.115	0.167
TIERRA BLANCA	18.63032	-96.15522	0.153	0.168
TRES VALLES	18.231	-96.132	0.099	0.118
YANGA	18.82543	-96.79071	0.077	0.175

Tabla 8: Valores medios de Concentración de Actividad Alfa y Beta Global en Lluvias

MUNICIPIO	UBICACIÓN		PROMEDIO ALFA	BETA
ALTO LUCERO DE GUTIERREZ BARRIOS	19.70641	-96.43159	0.625	0.755
BANDERILLA	19.58988	-96.94425	0.030	0.091
TECOLUTLA	20.25037	-96.94425	0.163	0.530
CAMERINO Z. MENDOZA	18.79346	-97.19874	0.063	0.081
COTAXTLA	18.82034	-96.34871	0.101	0.180
NAUTLA	20.15704	-96.71706	0.140	1.318
JAMAPA	19.03812	-96.22573	0.115	0.215
ACTOPAN	19.69853	-96.41605	0.161	0.191
VEGA DE ALATORRE	19.96973	-96.60164	0.095	0.146
JUCHIQUE DE FERRER	19.79197	-96.67081	0.078	0.097
LA ANTIGUA	19.36506	-96.36894	0.128	0.190
MEDELLIN	19.01771	-96.13743	0.094	0.115
NOGALES	18.82071	-97.16451	0.153	0.198
ORIZABA	18.86339	-97.07618	0.063	0.087
PASO DE OVEJAS	19.303	-96.439	0.075	0.150
TLALIXCOYAN	18.7439	-96.1375	0.128	0.398
JUCHIQUE DE FERRER	19.76176	-96.67541	0.052	0.068
PLAYA VICENTE	17.83254	-95.81519	0.068	0.378
SOLEDAD DE DOBLADO	19.04594	-96.42056	0.094	0.124
TIERRA BLANCA	18.63032	-96.15522	0.117	0.322
TRES VALLES	18.231	-96.132	0.097	0.119
YANGA	18.82543	-96.79071	0.077	0.164

Tabla 9. Resultados de concentración de actividad alfa y beta global en otros países.

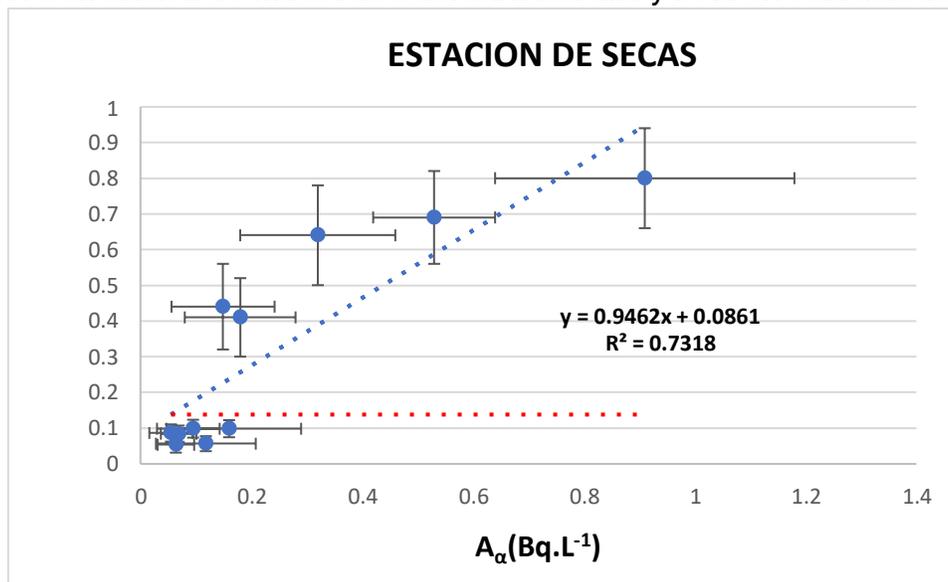
Region/País	A_{α} (BqL ⁻¹)		A_{β} (BqL ⁻¹)		Referencias
	Media	Rango	Media	Rango	
Wisconsin/USA		0.037- 5.320		0.0925- 1.924	Arndt et al.
Albania	-	0.01-0.126		0.029-0.884	Cfarku et al.
Saudi Arabia	3.15	-	5.39	-	Alkhomashi
Balaton/Hungría		0.026- 1.749		0.033-2.015	Jobbágy et al.
Galati/Rumania	0.022	<0.006- 0.0852	0.076	<0.025- 0.435	Pintilie et al.
Jordania	-	0.26-3.58	-	0.51-3.43	Alomari et al.
Katsina/Nigeria	-	0.080- 2.300	-	0.120-4.970	Muhammad et al.
Turquía	0.164	0.007- 3.042	0.555	0.021-4.845	Taskin et al.
Turquía	0.0493		0.1284		Osmanlioglu,
Sur/Vietnam	0.183	0.024- 0.748	0.152	0.027-0.632	Ho et al.
Sudáfrica	-	0.0041- 0.0053	-	0.0083- 0.0105	Madzunya
México	0.376	0.052-0.95	0.389	0.034-1.48	Estudio actual

Evaluación de la dosis efectiva anual para la ingestión de las muestras de agua

Los radionúclidos causantes de los resultados de concentración alfa y beta global no se investigaron a totalidad en este trabajo. Los radionúclidos promotores de la actividad alfa global en el agua se deben principalmente al uranio y su descendencia, como el Ra-226. La concentración de actividad beta global son probablemente causadas por la contribución del K-40, Pb-210 y Ra-228. Las 16 muestras con una concentración de actividad alfa global por arriba del CMD y las 95 muestras con una concentración de actividad beta global fueron contrastadas

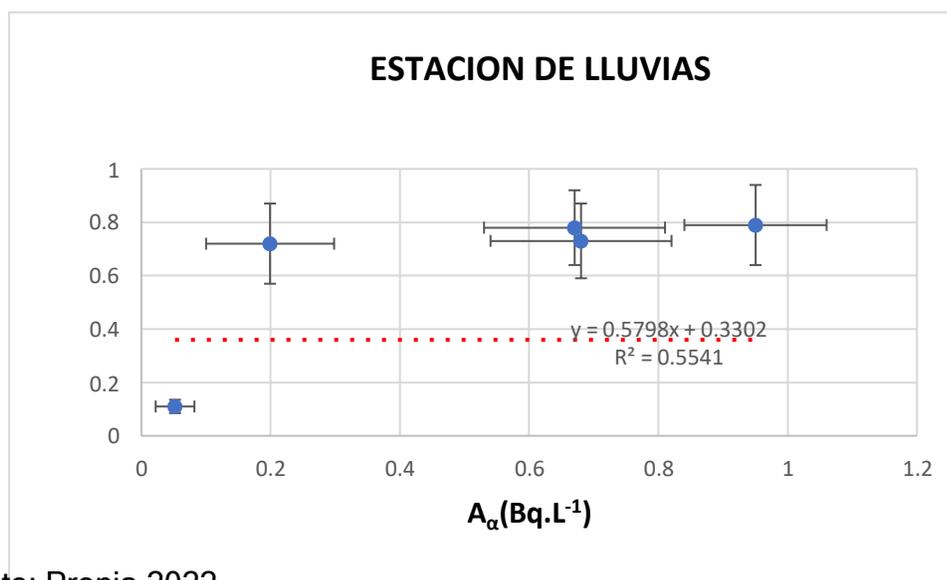
para determinar la fuerza de correlación entre las concentraciones de actividad alfa y beta global, presentando un factor de correlación de Pearson negativo de -0.18 y -0.44 para secas y lluvias respectivamente lo que significa que existe una nula correlación y que los radionúclidos que constituyen esta concentración de actividad alfa y beta global probablemente sean de origen natural como Ho.2020 ver figuras 11 y 12

Fig.11: Correlación de muestras con Actividad alfa y beta en estación de secas



Fuente: Propia,2022

Fig.12: Correlación de muestras con Actividad alfa y beta en estación de lluvias



Fuente: Propia.2022

Se estimó la dosis efectiva anual para lo cual se consideró factores dosimétricos de radionúclidos como el Po-210 y Ra-226 para la alfa global y Pb-210 y Ra-228 para la beta global. Las dosis efectivas anuales (mSv y^{-1}) se realizó con un grupo de edad adulta en la parte central del estado de Veracruz, México debido para las muestras de secas, las dosis efectivas anuales para los emisores alfa de radionúclidos como el Po-210 y Ra-226 se calcularon con rangos entre 0,048-0,797 y 0,011-0,186 mSv y^{-1} , con valores medios de $0,211 \pm 0,086 \text{ mSv y}^{-1}$ y $0,049 \pm 0,020 \text{ mSv y}^{-1}$, respectivamente. Además, para las muestras de agua de estación de Lluvia, las dosis efectivas anuales para los emisores alfa de radionucleidos Po-210 y Ra-226 se calcularon con rangos entre 0,046-0,832 mSv y^{-1} y 0,011-0,194 mSv y^{-1} con valores medios de 0.447 ± 0.091 y $0.104 \pm 0.021 \text{ mSv y}^{-1}$ respectivamente, ver tabla 10.

Tabla 10. Dosis efectiva anual en estaciones de secas y lluvia en la zona de estudio

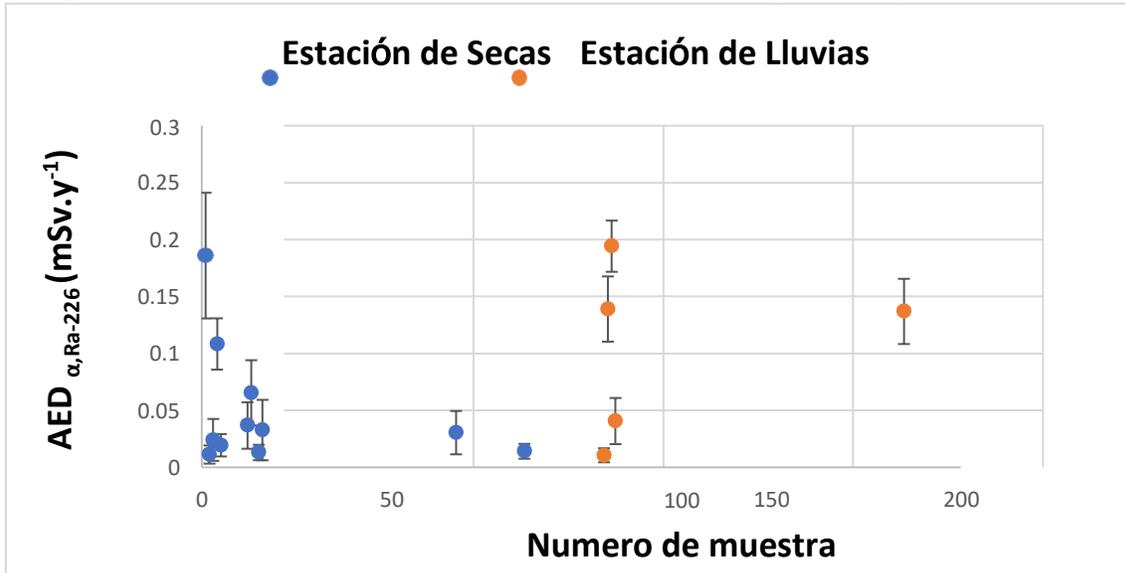
Radionúclidos	Estación de Secas				Estación de Lluvias			
	Media		Rango		Media		Rango	
Po-210	0.211	0.086	0.048	0.797	0.447	0.091	0.046	0.832
Ra-226	0.049	0.020	0.011	0.186	0.104	0.021	0.011	0.194
Pb-210	0.212	0.058	0.017	0.710	0.179	0.051	0.029	0.745
Ra-228	0.212	0.058	0.017	0.710	0.179	0.051	0.029	0.745
WHO 0.1 mSv y^{-1}								

Contrastar el valor de Ra226 o el del Radón 222

Para las muestras de secas, las figuras. 13 y 14 muestran que las dosis efectivas anuales son de 7 muestras para Po-210 y 2 muestras para Ra-226 son superiores a los 0,1 mSv y^{-1} recomendados por la OMS y el OIEA. Sin embargo, para la estación de lluvias las dosis se reducen en 4 muestras para Po-210 y en 3 muestras quedan para Ra-226. Además, el valor medio de la dosis efectivo anual

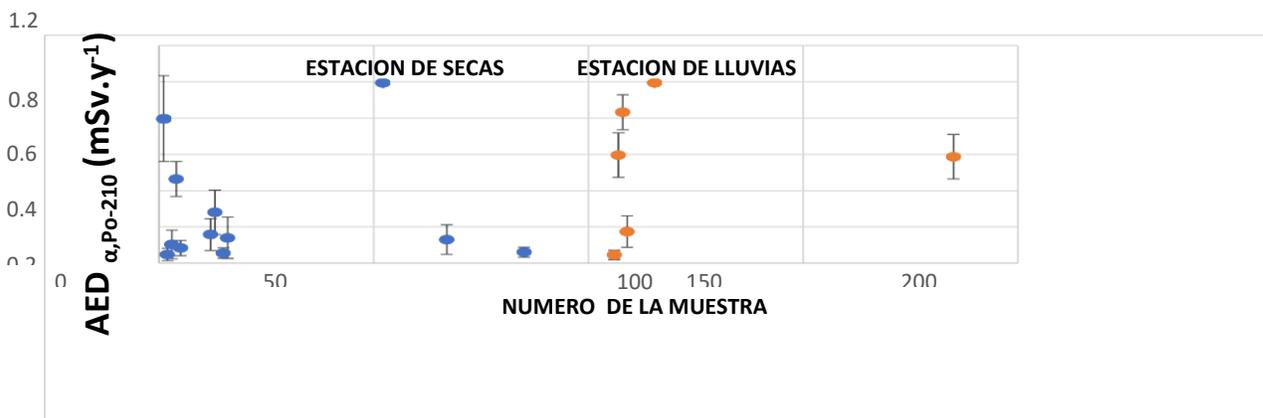
para el Po 210 es 2 veces mayor y de hasta 7 órdenes con respecto al nivel recomendado por la WHO.

Fig.13: Dosis efectiva anual en estaciones de secas y lluvias para el Ra-226



Fuente:

Fig.14: Dosis efectiva anual en estaciones de secas y lluvias para el Po-210



Fuente: Propia.2022

Las medias de las dosis efectivas anuales para los radionúclidos Pb-210 y Ra-228 son superiores a los valores de referencia recomendados por la OMS y el OIEA, si

bien casi es el 50 % de las muestras registradas con un valor de concentración de actividad beta en la estación de secas y de lluvias ya que de las 115 muestras con una concentración de actividad beta global 58 en secas y 57 en la estación de lluvias, el 55.2 % de las muestras superan el nivel de 0.1 mSv \cdot y $^{-1}$, en secas y 51% en la estación de lluvias, ver figuras 15 y 16, no así en el caso de la DEA para el Ra-226 la cual es menor al nivel recomendado por los organismos internacionales tanto en la estación de secas como de lluvias.

Fig.15: Dosis efectiva anual en estaciones de secas y lluvias para el Ra-228

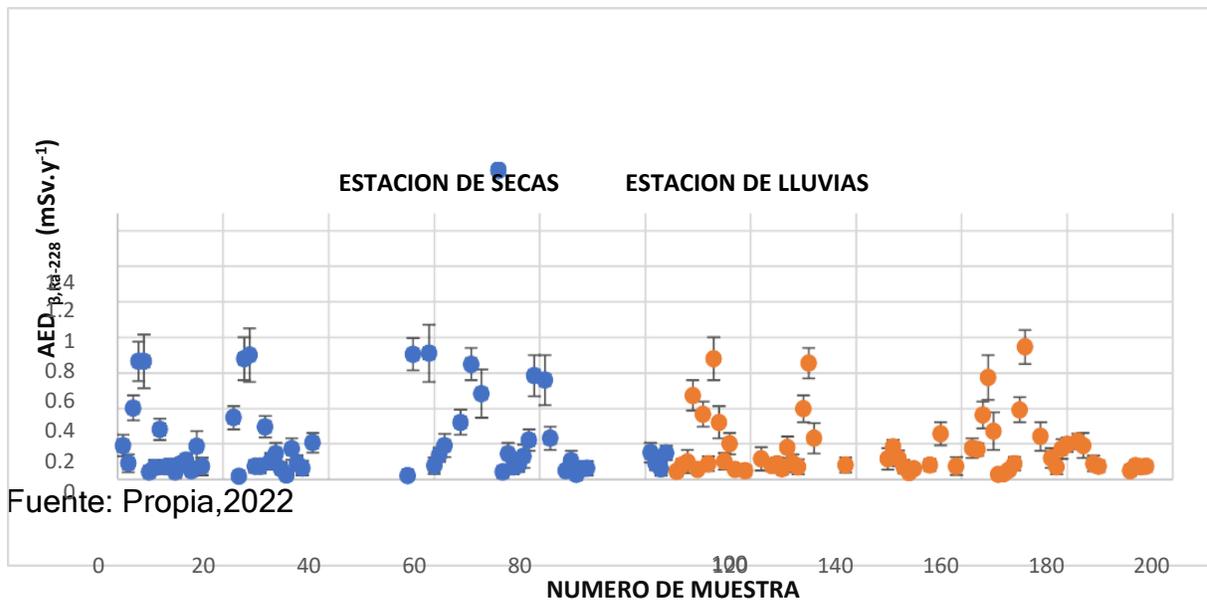
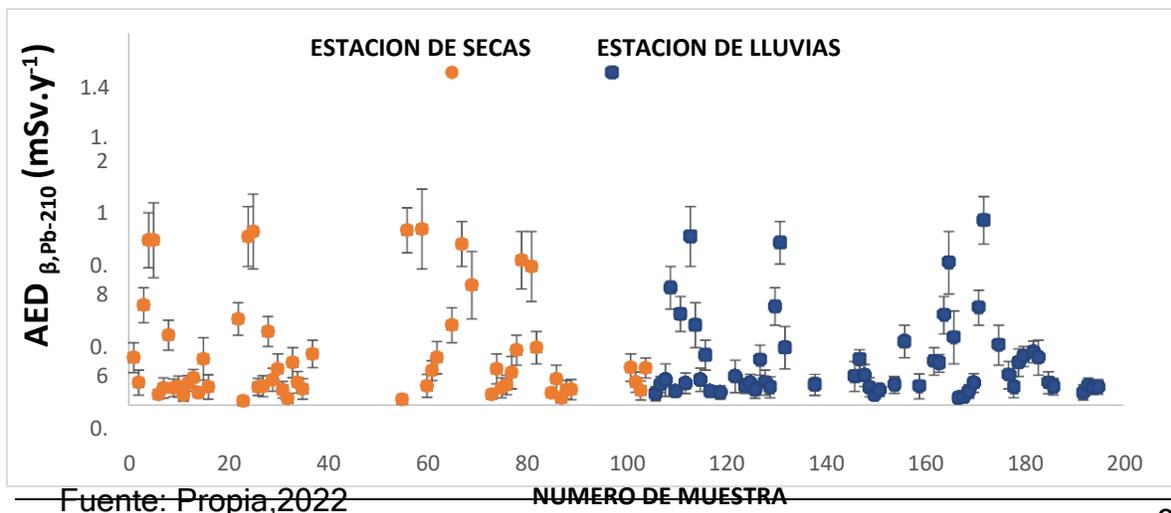


Fig.16: Dosis efectiva anual en estaciones de secas y lluvias para el Pb-210

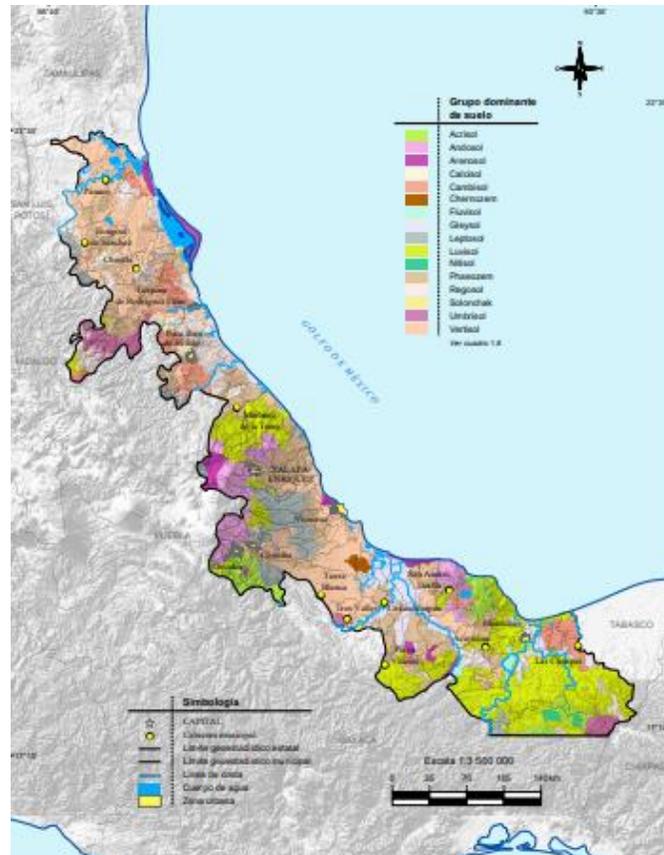


En el presente trabajo, se evaluó la dosis efectiva anual de las muestras de agua para evaluar su cumplimiento. Con normativa nacional e internacional. Por lo tanto, este trabajo se puede utilizar como un referente en función de la concentración de actividad alfa y beta total en la toma de decisiones si llegasen a cambiar estos valores por la contribución de radiactividad en el ambiente debido a actividades industriales y otras actividades humanas cabe aclarar que los valores de las dosis efectiva anual se estimaron para los cuatro radionúclidos como un supuesto ya que no se tiene la certeza de que tipo de radionúclido son, ya que los cálculos de dosis efectiva anual se realizaron con las concentraciones totales de actividad alfa y beta total y no representan la realidad ya que no son atribuibles a los radionúclidos en cuestión ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{228}Ra , y ^{226}Ra .

Para la selección de suelos al realizar el estudio se seleccionaron localidades de interés considerando los tipos de suelo y sus constituyentes principales para contrastar los resultados según el objetivo de esta investigación y se encontró que en los puntos que se encontraron radionúclidos con una concentración promedio superior a la considerada en la norma oficial mexicana 127 de agua de uso y consumo humano vigente cuyo límite es de 1.0 BqL^{-1} , para beta global y de 0.5 BqL^{-1} para alfa global, las localidades Tecolutla y Nautla en el estado de secas sobresalen para la concentración promedio de actividad beta, así mismo Nautla en el estado de lluvias sobresale su concentración promedio de actividad beta y se atribuye muy probablemente a que son suelos fértiles en magnesio y potasio siendo este último un emisor beta estas propiedades son características del tipo de suelo denominado Phaeozem ver el anexo 2, . y para la concentración promedio de actividad alfa en el estado de lluvias Alto Lucero de Gutiérrez Barrios, la muestra fue colectada en el tipo de suelo que corresponde al Vertisol el cual es definido como un suelo con alta capacidad de retención de humedad e intercambio de minerales, ver anexo 2.(Cartas Edafológicas- INEGI 2021) y que se estima que es el Radio 226 un radionuclido que se encuentra en la cadena de decaimiento del Uranio 238, y que se ha reportado en la bibliografía cabe resaltar que este

radionuclido tiene su propio valor de referencia para cuando se apliquen los criterios radiológicos en caso de ingesta, y que uso y consume humano en esta localidad esta limitado ya que su pH es acido.

Fig.17 Tipos de Suelo para el Estado de Veracruz



Como se aprecia en la figura 17 ver anexo 2 tipos de suelo en el estado de Veracruz,

Análisis estadístico de la medición de concentración de actividad radiológica alfa en las localidades de estudio en la época de secas

Se realizó un estudio radiológico de agua de uso y consumo humano en las zonas rurales de Alto lucero(AL), Banderilla(BAN), Tecolutla(TECO), Ciudad Mendoza(CDMEN), Cotaxtla(COTAX), Nautla(, NAUT)Jamapa(JAMA), Actopan(ACT), Vega de Alatorre (EC), Juchique de Ferrer(JF), La Antigua(JC), Medellín(MED), Nogales(NOG), Orizaba(ORI), Paso de Ovejas(PO), Tlaxicoyan(PN), Plan de las Hayas(PH), Playa Vicente(PV), Soledad de doblado(SD), Tierra blanca(TB), Tres Valles(TV), Yanga(YAN). Que corresponden a la zona centro del Edo. De Veracruz, para inferir el nivel de contaminación radiológica en el estado de Veracruz.

Los datos obtenidos de enero a junio correspondientes a la época de secas en las diferentes estaciones de muestreo fueron analizados por análisis de varianza

Tabla 11 Análisis de Varianza (ANOVA) de los datos muestreados en la estación de secas de las 22 localidades del estado de Veracruz.

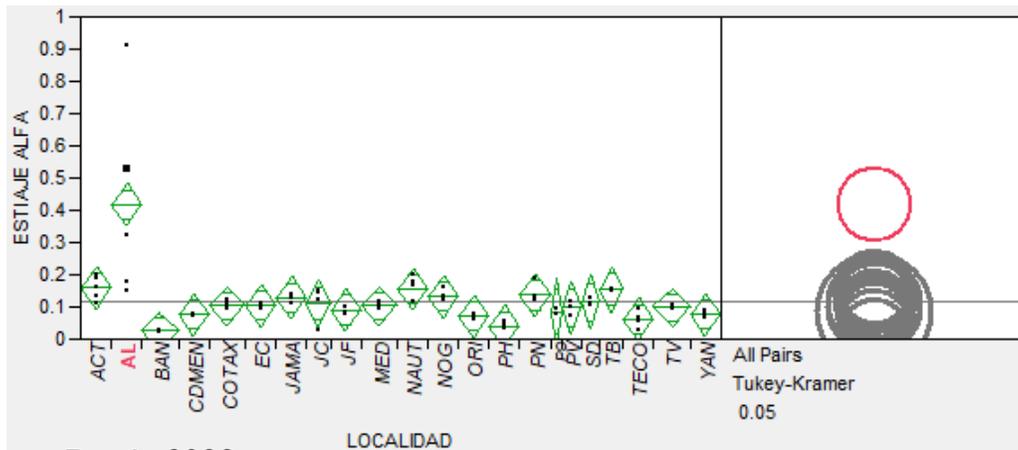
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados de medias	Razón F	Probabilidad >F
Localidad	21	0.6097905	0.029038	5.6788	<.0001*
Error	83	0.4244088	0.005113		
C. Total	104	1.0341992			

Conforme al análisis de varianza se encontró que existe diferencia significativa entre el municipio de alto lucero y las demás localidades a una probabilidad de $p \leq 0.05$.

Las medias aritméticas fueron comparadas con la prueba estadística de Tukey-Kramer HSD a un nivel de significancia del 5% este comportamiento se puede observar en la figura 15 en donde la media aritmética de Alto Lucero corresponde a 0.42 Bq/L a pesar de ser diferente significativamente a las demás mediciones es

menor que el valor de 0.5 Bq/L establecido por la norma oficial mexicana 0127-SSA1 -2021.

Fig.18: Comparación de medias aritméticas de la concentración de actividad alfa en las localidades del Estudio en la Zona rural del Estado de Veracruz, para la época de secas



Fuente: Propia,2022

La actividad alfa total mínima y máxima obtenida fue 0.0041 (Bq.L⁻¹) y 0.0053 (Bq.L⁻¹) respectivamente, mientras que la actividad beta total mínima y máxima obtenida para las muestras de agua fue 0.0083 (Bq.L⁻¹) y 0.0105 (Bq.L⁻¹) respectivamente D Madzunya en Sudáfrica

Los resultados alfa total en las muestras de agua variaron de 0.024 a 0.748 Bq L⁻¹ con una media de 0.183 ± 0.034 Bq L⁻¹, y los resultados beta total en las muestras de agua variaron de 0.027-0.632 Bq L⁻¹ con una media de $0,152 \pm 0,015$ Bq L⁻¹. Phan long Jo en Vietnam reporto estos valores, lo que nos da una idea clara de que el valor de 0.42 Bq L⁻¹ en el municipio de Alto Lucero si bien está por debajo del valor del límite de la norma NOM-127-SSA1-2021 es superior a los reportados por D. Madzunya en sudafrica y Phan long Jo en Vietnam.

Con el resultado obtenido podemos concluir que no existe un riesgo asociado a la salud de la población en esta zona rural, así como las demás estaciones estudiadas, por la ingesta de agua ya que no generaría un efecto deletéreo en la

salud de la población.

Medición de concentración de actividad radiológica alfa en las localidades de estudio en la época de lluvias

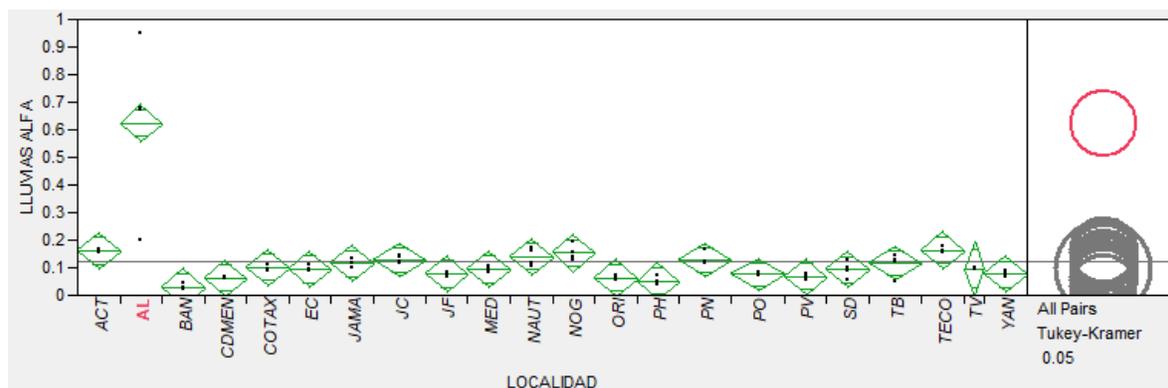
Los datos obtenidos de julio a octubre correspondientes a la época de lluvias en las diferentes estaciones de muestreo fueron analizados por análisis de varianza.

Tabla 12. Análisis de Varianza (ANOVA) de los datos muestreados en la estación de lluvias de las 22 localidades del estado de Veracruz para la concentración alfa.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados de medias	Razón F	Probabilidad >F
Localidad	21	1.1618707	0.055327	12.0393	<.0001*
Error	68	0.3124973	0.004596		
C. Total	89	1.4743680			

Y Las medias aritméticas fueron comparadas con la prueba estadística de Tukey-Kramer HSD a un nivel de significancia del 5 % este comportamiento se puede observar en la figura 19, en donde la media aritmética de Alto Lucero corresponde a 0.62 Bq/L a pesar de ser diferente significativamente a las demás mediciones de las localidades contempladas en este estudio es mayor que el valor de 0.5 Bq.L⁻¹ establecido por la norma oficial mexicana 127-SSA1- 2021.

Fig. 19: Comparación de medias aritméticas de las localidades de Estudio en la Zona rural del Estado de Veracruz en época de lluvias para la concentración de actividad radiológica Alfa.



Fuente: Propia, 2022

Nautla y Tecolutla son iguales en el nivel de concentración de actividad radiactiva de emisores beta en secas, pero difieren significativamente de las 21 localidades restantes a $p \leq 0.05$. Alto Lucero y Playa Vicente son iguales en concentración, pero diferentes Tlaxcoyan, La Antigua y restantes. Playa Vicente y Tlaxcoyan son iguales en Concentración; y a partir de Tlaxcoyan, La Antigua, Nogales, Actopan, Tierra Blanca, Soledad de Doblado, Paso de Ovejas son iguales en concentración; Nogales, Actopan, Yanga, Tierra Blanca, Jamapa, Soledad de Doblado, Cotaxtla, Paso de Ovejas, Tecolutla, La Antigua, Tres Valles, Juchique de Ferrer, Ciudad Mendoza, Orizaba, Banderilla y Plan de las Hayas son iguales en concentración.

Se concluye que Nautla y Tecolutla (1.3-1.2 Bq/L) a pesar de ser diferentes significativamente a las concentraciones de actividad beta de las 20 localidades restantes analizadas se encuentra por arriba del límite de norma el cual es de 1.0 Bq/L pero no va a ocasionar algún problema deletéreo en la salud de la población rural del estado Veracruz centro.

Tabla 13. Comparación para todos los pares usando Tukey Kramer HSD concentración de actividad beta en secas

LOCALIDAD	N A U T L A	T E C O L U T L A	A L T O L U C E R O	P L A Y A V I C E N T E	P L A Y A V I C E N T E	J U C H I Q U E D E F E R R E	N O G A L E S	A C T O P A N	Y A N G A	T I E R R A B L A N C A	J A M A P A	S O L E D A D D E D O B L A D O	C O T A X T L A	P A S O D E O V E J A S	M E D I D A	E C I D I A D E	T R E S V A L L E S	J U C H I Q U E D E F E R R E	C I U D M E N D O Z A	O R I Z A B A	B A N D E R I L L A	P L A N D E L A S H A Y A S
MEDIA ARITMETICA (Bq/L)	1.304	1.2384	0.596	0.482	0.354	0.267	0.2203	0.119	0.1175	0.1167	0.1167	0.1152	0.1142	0.1126	0.1121	0.1118	0.1102	0.1088	0.1084	0.1079	0.1044	0.1044

	A	A	B	B C	C D	D E	D E F	D E F	E F	D E F	E F	D E F	E F	D E F	E F	E F	E F	E F	E F	F	F
--	---	---	---	--------	--------	--------	-------------	-------------	--------	-------------	--------	-------------	--------	-------------	--------	--------	--------	--------	--------	---	---

Niveles no conectados con la misma letra son significativamente diferentes a $p \leq 0.05$

Medición de concentración de actividad radiológica beta en las localidades de estudio en la época de lluvias.

Tabla 14. Comparación para todos los pares usando Tukey Kramer HSD concentración de actividad beta en lluvias

LOCALIDAD	N A U T	A L	T E C O	P N	P V	T B	J A M A	N O G	A C T	J C	C O T A X	Y A N	P O	E C	S D	T V	M E D	J F	B A N	O R I	C D M E N	P H	
MEDIA ARITMÉTICA (Bq/L)	1.3177	0.755	0.530	0.398	0.378	0.321	0.214	0.198	0.191	0.189	0.179	0.163	0.149	0.145	0.123	0.119	0.115	0.100	0.091	0.087	0.081	0.067	
	A	B	B C	C D	C D E	C D E F	D E F G	D E F G	D E F G	D E F G	D E F G	D E F G	E F G	E F G	E F G	D E F G	F G	F G	F G	F G	F G	F G	G

Niveles no conectados con la misma letra son significativamente diferentes a $p \leq 0.05$

Nautla presenta diferencia significativa de las 21 localidades restantes a $p \leq 0.05$. Alto Lucero y Tecolutla son iguales en concentración, pero diferentes a Nautla, Tlaxicoyan, Playa Vicente y municipios restantes. Tecolutla, Tlaxicoyan, Playa Vicente, y Tierra Blanca son iguales en Concentración; y a partir de Playa Vicente hasta Tres valles son iguales en la concentración; Tierra blanca, Jamapa, Nogales, Actopan, La Antigua, Cotaxtla, Yanga, Paso de Ovejas, Vega de Alatorre, Soledad de Doblado, Tres Valles, Medellín, Juchique de Ferrer, Banderilla, Orizaba, Ciudad Mendoza tienen la misma concentración. Y Jamapa, Nogales, Actopan, La Antigua, Cotaxtla, Yanga, Paso de Ovejas, Vega de Alatorre, Soledad de Doblado, Tres Valles, Medellín, Juchique de Ferrer, Banderilla, Orizaba, Ciudad Mendoza, y plan de las hayas presentan la misma concentración.

En el agua subterránea se confirma la presencia de radionúclidos emisores alfa en las localidades como arroyo agrio municipio de alto lucero si bien se encuentra por arriba de la concentración de actividad que se reporta en el marco normativo lo que obliga a realizar un análisis de espectrometría gamma asumiendo equilibrio con ^{226}Ra o por centelleo líquido en búsqueda de radionúclidos que confirmen este incremento como alcance a los resultados presentados en la determinación de alfa y beta global en el centro del estado de Veracruz esto de acuerdo a los criterios que se establecen a nivel mundial (WHO) ya que si se supera algunos de los niveles de diagnóstico de cribado se deben determinar las concentraciones de radionúclidos individuales y compararlas con los niveles de orientación el resultado de esta evaluación adicional podrá indicar si se toma una acción adicional para la toma de decisiones y con ello reducir la dosis por ingesta de agua,

. En las comunidades del estado de Veracruz en donde si se consume el agua es

necesario establecer medidas de regulación sanitaria como el hervir el agua antes de su ingesta

y aplicar una filtración o decantación de la misma como son las comunidades localizadas en los municipios de Tecolutla y Nautla en donde se percibe una concentración de actividad de partículas emisoras beta atribuidas posiblemente al radionúclido de potasio 40 llevar a cabo la filtración de la misma antes de ingerir y realizar más estudios aplicados al tipo de suelo en las zonas rurales.

LIMITANTES DE ESTE TRABAJO

Si bien este estudio radiológico permite tener información para la toma de decisiones es necesario tener una mayor cobertura de las localidades de las zonas rurales ya que es un derecho fundamental de la población asentada en esas zonas.

Otra limitante es considerar los criterios radiológicos para las zonas rurales en el país dando oportunidad a tener un referente en la materia y no tan solo como se ve plasmada en la normatividad de agua de uso y consumo humano en la NOM-127 - SSA1-2021.

9.CONCLUSIONES

El presente trabajo puede ser utilizado como referente en la concentración de actividad alfa y beta global hoy en día ya que en el estado de Veracruz se encuentra la única planta de energía nuclear denominada Laguna verde, así como las diferentes actividades antropogénicas que conlleva el uso de material radiactivo y que pueden incrementar con su contribución la concentración de actividad de la zona estudiada.

Estimaciones futuras deben llevarse a cabo en la zona de estudio en que se presentaron mayor concentración de actividad alfa como es el caso de Alto lucero de Gutiérrez Barrios y determinar la actividad específica de sus constituyentes. Se observó que durante el primer semestre la mayoría de las mediciones rebasaron la norma y concentrándose más por los fenómenos fisicoquímicos al no haber dilución como se manifestó en época de lluvias en donde si bien disminuye aún se encuentra por arriba de los valores normativos.

Si bien se estimó la concentración de actividad alfa y beta global falta analizar y determinar que radionúclidos emisores alfa y beta originan ese incremento que supera los valores normativos, si bien podemos inferir que es el Ra226 como emisor alfa y se encuentra en ese tipo de suelo es necesario realizar más estudios que confirmen estos valores.

fue posible cumplir con los objetivos que se postularon en este trabajo, debido a que este estudio se realizó en época de secas y de lluvias para realizar el análisis estadístico con respecto al tipo de suelo y al factor de dilución para concretar con el cálculo de la dosis efectiva anual en estimaciones ya que el estudio se realizó con las concentraciones de actividad alfa y beta total y no para los radionúclidos

con que se calculó la dosis efectiva.

El desempeño del método con el que cuenta el Departamento de Control Radiológico del LESP con respecto a las recomendaciones de la OMS, por lo menos en la primera parte al emplear como indicadores los valores de 1 Bq/l para actividad beta total y 0.5 Bq/l para actividad alfa global es adecuado y se cumple con el límite solicitado por la actual norma.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

A.C. Leitão, R. Alcantara, Respostas celulares às lesões induzidas por agentes físicos e químicos. radiobiologia e fotobiología Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro; (1994)

Acosta, S.; Equillor, E.; Muñoz, J, Concentración de Actividad alfa y beta en aguas potables: Determinación y resultados, X Congreso Regional Latinoamericano IRPA de Protección y Seguridad Radiológica “Radioprotección: Nuevos Desafíos para un Mundo en Evolución” Buenos Aires, 12 al 17 de abril, 2015 SOCIEDAD ARGENTINA DE RADIOPROTECCIÓN. Autoridad Regulatoria Nuclear, Buenos Aires, Argentina

Aguirre Gómez Jaime M en C., Parámetros Radiactivos y Riesgos a la Salud, Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias. Seminario de presentación de la Norma Oficial Mexicana: Agua para Uso y Consumo Humano; COFEPRIS, 23 de Marzo del 2007.

Alkhomashi, N., Al-Hamarneh, I. F., & Almasoud, F. I. (2016). Determination of natural radioactivity in irrigation water of drilled wells in northwestern Saudi Arabia. *Chemosphere*, 144, 1928-1936.

Alomari, A. H., Saleh, M. A., Hashim, S., Alsayaheen, A., & Abdeldin, I. (2019). Measurement of gross alpha and beta activity concentration in groundwater of Jordan: groundwater quality, annual effective dose and lifetime risk assessment. *Journal of water and health*, 17(6), 957-970.

Angeles,A.;Quintero,E.;..(2020) Measurement of Content of 226Ra in Drinking Water From Some States of Mexican Republic by Liquid Scintillation Method, *J. Nucl. Phys. Mat. Sci. Rad. A. Vol. 7, No. 2, Feb. 2020, pp.195-201*

Anna Azvolinsky. Brain tumors. *Radiation Oncology* 2012. Disponible en: <https://www.cancernetwork.com/brain-tumors/there-connection-between-incidence-brain-cancer-among-interventional-cardiologists>.

APHA, AWWA, WEF (2005) Standard methods for the examination of water and

wastewater, 21st ed. Washington, DC, American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, pp. 7-15.

Arndt, M. F., & West, L. (2004). A Study of the Factors Affecting the Gross Alpha Measurement, and a Radiochemical Analysis of some Groundwater Samples from the State of Wisconsin Exhibiting an Elevated Gross Alpha Activity. Proceedings 51st Annual Conference on Radiobioassay and Radiochemical Measurement. Cincinnati.

Bem, H., Plota, U., Staniszewska, M. et al. Radon (^{222}Rn) in underground drinking water supplies of the Southern Greater Poland Region. *J Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 299, 1307-1312 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2912-1>

Bonotto D.M, Natural radionuclides in major aquifer systems of the Paraná sedimentary basin, Brazil. *Applied Radiation and Isotopes*.2011;69:1572-1584. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.06.002>

Bouville, A. and W.M. Lowder. Human population exposure to cosmic radiation. *Radiat. Prot. Dosim.* 24: 293-299 (1988).

Bronzovic M, Marovic G. Age-dependent dose assessment of ^{226}Ra from bottled water intake. *Health Phys* 2005;88:480. <http://dx.doi.org/10.1097/01.HP.0000154007.12917.88>

Cartas Edafológicas INEGI 2021

Cfarku, F., Xhixha, G., Bylyku, E., Zdruli, P., Mantovani, F., Përpunja, F., ... & Thoma, H. (2014). A preliminary study of gross alpha/beta activity concentrations in drinking waters from Albania. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*,

301(2), 435-442.

Colmenero Sujo, L. H., Villalba, M. de L., Rubio Arias, H., Montero Cabrera, M., & Silva Hidalgo, H. (2016). NORM determination in urban soils from selected cities in Chihuahua, Mexico. *Acta Universitaria*, 26(2), 36-42. doi: 10.15174/ au.2016.939

Comision federal para protección contra riesgos sanitarios 2020 , oficio No.CAS/TA/08/2021

Comisión Nacional del Agua (2012): Estadísticas del Agua en México, 2011. Agua en el mundo. Available in http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/sina/capitulo_8.pdf

Currie.L.A.1968 .Limits for qualitative detection and quantitative determination-application to radiochemistry. *Anal.Che.*68:586

Compendio de criterios técnicos. CCAYAC. Primera revisión 2020.

D.C. Kocher, Nuclear Decay Data for Radionuclides Occurring in Routine Releases from Nuclear Fuel Cycle.

Dołhańczuk-Śródka, A. (2012). Estimation of external gamma radiation dose in the area of Bory Stobrowskie forests (PL). *Environmental monitoring and assessment*, 184(9), 5773-5779.

Efectos y fuentes, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016 ISBN No : 978-92-807-3599-4 Trabajo No : DEW/2035/NA Copyright © Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016 Versión electrónica

Faanu A, Lawluvi H, Kpeglo D.O, Darko E.O, Emi-Reynolds G, Awudu A. R, Adukpo O.K, Kansaana C, Ali I.D, Agyeman B, Agyeman L, Kpodzro R, Assessment of natural and anthropogenic radioactivity levels in soils, rocks and water in the vicinity of Chirano Gold Mine in Ghana, Radiation Protection Dosimetry, Volume 158, Issue 1, January 2014, Pages 87-99, <https://doi.org/10.1093/rpd/nct197>

Fatima I, Zaidi J, Arif M, Tahir S.N.A, Measurement of natural radioactivity in bottled drinking water in Pakistan and consequent dose estimates, Radiation Protection Dosimetry, Volume 123, Issue 2, February 2007, Pages 234-240, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncl093>

García-Talavera, M., Matarraz, J. L. M., Martínez, M., Salas, R., & Ramos, L. M. (2007). Exposición de la población española a la radiación ionizante de origen natural. Seguridad nuclear: Revista del CSN, (43), 40-46

Gharbi F, Baccouche S, Abdelli W, Samaali M, Oueslati M., Trabelsi A; uranium isotopes in tunisian bottled mineral Waters. J Environ Radioact 2010;101: 589-590. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.03.001>

Gleick PH. Water in crisis: a guide to the world's fresh water resources. New York: Oxford University Press; 1993.

Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda ISBN 978-92-4-004506-4 (electronic version) ISBN 978-92-4-004507-1 (print versión)

Ho PL, Hung LD, Minh VT, Chinh DV, Thanh TT, Tao CV. Simultaneous Determination of Gross Alpha/Beta Activities in Groundwater for Ingestion Effective Dose and its Associated Public Health Risk Prevention. Sci Rep. 2020 Mar

9;10(1):4299. doi: 10.1038/s41598-020-61203-y. PMID: 32152426; PMCID: PMC7062759.

Huy NQ, Luyen TV (2006) Study on external exposure poses from terrestrial radioactivity in Southern Vietnam. *Radiat Prot Dosim* 118(3):331-336

IAEA, International Atomic Energy Agency. *Biological Dosimetry: Chromosomal Aberration Analysis for Dose Assessment*. Technical Report Series, 260. Vienna: IAEA; 1986.

IAEA. (2016) *Criteria for radionuclide activity concentrations for food and drinking water*, 10-25.

ICRP. *Compendium of dose coefficients based on ICRP publication 60* (eds Clement, C. H. et al.), 51-53. ICRP Publication 119. *Ann. ICRP* 41(Suppl.) (2012)

INEGI.2020. *Anuario estadístico y geográfico de Veracruz ,México* available in: www.inegi.org.mx

Informe UNSCEAR 2020/2021 vol.III: “ Fuentes, efectos y riesgos de las radiaciones ionizantes”.

ININ 2018 Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares *Curso de Encargado de Seguridad radiológica*

International Commission on Radiological Protection. *Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4. Inhalation dose coefficients*. ICRP Publication 71. *Annals of the ICRP* 25(3-4). Pergamon Press, Oxford, 1995.

International Commission on Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 5. Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients. ICRP Publication 72. Annals of the ICRP 26(1). Pergamon Press, Oxford, 1996.

International Commission on Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4. Inhalation dose coefficients. ICRP Publication 71. Annals of the ICRP 25(3-4). Pergamon Press, Oxford, 1992.

International Commission on Radiological Protection. Radiation Protection: 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: Adopted by the Commission in November 1990. ICRP Publication, 60. Oxford: Published for the International Commission on Radiological Protection; 1992.

I.R Ajayi, O.O Kuforiji, Natural radioactivity measurements in rock samples of Ondo and Ekiti states in Nigeria, Radiation Measurements, Volume 33, Issue 1, 2001, Pages 13-16, ISSN 1350-4487. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(00)00092-5).

ISO 9696. Water Quality . Measurement of gross alpha activity in non-saline water. Thick source method. Geneva: International Organization for Standardization:2017

ISO 9697. Water Quality . Measurement of gross beta activity in non-saline water. Thick source method. Geneva: International Organization for Standardization:2015

ISO-10704 Calidad del agua- Actividad alfa total y beta total-método de prueba utilizando depósito de fuente delgada:2009

Ivanovich M, Harmon RS. Uranium-series disequilibrium. 2. ed Oxford: Clarendon

Press:1992.

J. Anselmo Puerta-Ortiz, Javier Morales-Aramburo, Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes, Revista Colombiana de Cardiología, Volume 27, Supplement 1, 2020,Pages 61-71, ISSN 0120-5633,

J. Hall Eric, J. Giaccia Amato Radiobiology for the Radiologist. 7th. ed Wolters Kluwer, Philadelphia (2012)

Jankovic M,Todorovic D,Todorovic N, Nikolov J. Natural radionuclides in drinking Waters in serbia. Applied Radiation and Isotopes.2012 Dec;70:2703-2710. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2012.08.013>.

Jia G, Torri G, Magro L. Concentrations of ²³⁸U, ²³⁴U, ²³⁵U, ²³²Th, ²³⁰Th, ²²⁸Th, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²²⁴Ra, ²¹⁰Po, ²¹⁰Pb and ²¹²Pb. In: drinking water in Italy: reconciling safety standards based on measurements of gross α and β . J Environ Radioact 2009;100:941. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.07.002>

Jobbágy V,Kávási N,Somlai J, Máté B, Kovács t. Radiochemical characterization of spring Waters in BalatonUpland, Hungary , estimation of radiation doce to members of public. Microchemical Journal.2010 Mar;94(2):159-165.

Kathren, R. L. (1998). NORM Sources and their origins. Applied radiation and isotopes, 49(3), 149-168

Karagas MR, Stannard VA, Mott LA, Slattery MJ, Spencer SK y Weinstock MA. Uso de dispositivos de bronceado y riesgo de cáncer de piel de células basales y de células escamosas. J Natl Cancer Inst 94: 224-226, 2002

Khalil F.A, Rafat M, Amin,MAK El Fayoumil. Natural radioactive nuclides and chemical components in the groundwater of Beni Suef Governate, Middle

Egypt.Journal of Radiological Protection.2009;29:105

Madzunya D, Dudu V.P, Mathuthu M, Manjoro M. Radiological health risk assessment of drinkingwater and soildust from Gauteng and North West Provinces , in South Africa.2020;6(2):<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03392>

Measurement of radionuclides in Food and the environment a Guidebook, Technical reports series No.295, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1989.

Mehra, R., Singh, S., Sing, K., & Sonkawade, R. (2007). 226Ra, 232Th and 40K analysis in soils sample from areas of Malwa region, Punjab, India using gamma ray spectrometry. Environmental monitoring and assessment, 134(1-3), 333-342.

Muhammad, B. G., Jaafar, M. S., & Akpa, T.C. (2010). Un estudio de las concentraciones brutas de actividad alfa y beta en las aguas subterráneas del área de Katsina en el norte de Nigeria. Dosimetría de protección radiológica, 141(2), 127-133.

NOM-127-SSA1-1994 Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

NOM-127-SSA1-2021. (2021). Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización

Norma Oficial Mexicana NOM-201-SSA1-2015, productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias.

NORMA Oficial Mexicana NOM-179-SSA1-2020, Agua para uso y consumo

humano. Control de la calidad del agua distribuida por los sistemas de abastecimiento de agua

Obrikat D, Beyermann M, Bünger Th, Viertel H. Natural radionuclides in water in Germany. Kerntechnik 2004;69:1-4.

Osmanlioglu, A. E., Kam, E., & Bozkurt, A. (2007). Assessment of background radioactivity level for Gaziantep region of southeastern Turkey. Radiation Protection Dosimetry, 124(4), 407-410.

“Página de la Environmental Protection Agency”, <http://www.epa.gov>

“Página de CONAGUA “, <http://www.conagua.gob.mx>

Pintilie, V., Ene, A., Georgescu, L. P., Moraru, L., & Iticescu, C. (2016). Measurements of gross alpha and beta activity in drinking water from Galati region, Romania. Romanian Reports in Physics, 68(3), 1208-1220.

PNUMA (2016) Efectos y fuentes, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016 ISBN No : 978-92-807-3599-4 Trabajo No : DEW/2035/NA Copyright © Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016 , pag.49 Versión electrónica

Publicación de IAEA www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1460_web.pdf,

Qu L, Yao D, Cong P, Xia N. Concentraciones de radiactividad en suelos en el área de Qingdao, China. Ann N Y Acad Sci. 2008 Oct;1140:308-14. doi: 10.1196/anales.1454.038. PMID: 18991929.

Rentería Villalobos, M, Montero Cabrera, M.E, Reyes Cortés, M, Herrera Peraza, E.F, Rodríguez Pineda, A, Manjón Collado, G, García Tenorio, R, Crespo, T, & Valenzuela Hernández, M. (2007). Characterization of source rocks and groundwater radioactivity at the Chihuahua valley. *Revista mexicana de física*, 53(Supl. 3), 16-22. Recuperado en 10 de enero de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0035-001X2007000900006&lng=es&tlng=en.

Rickert B, Chrus I, Schmoll O, editors. Protecting surface water for health Identifying, assessing and managing drinkingwater quality risks in surface-water catchments. WHO; 2016 [cited 2018 Apr 11]. Available from: <https://goo.gl/QnQrpU>.

Standard methods for the examination of water and wastewater, (2017), 23 rd edition 7-12.

Taskin H, Asliyukse H, Bozkurt A, Kam E. Natural radioactivity in bottled mineral and thermal spring waters of Turkey. *Radiat Prot Dosimetry*. 2013 Dec;157(4):575-8. doi: 10.1093/rpd/nct166. Epub 2013 Jun 23. PMID: 23798708.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes VOLUME I: SOURCES

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). (1994). Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Genova: Unsclear;1994.

World Health Organization. (2017) Guidelines for drinking-water quality 4ed Ch. 9, 203-218, WHO publications, Geneva.

World Health Organization. (2017) Guidelines for drinking-water quality 4ed Ch. 9, 203-218, WHO publications, Geneva.

Electronic version for the Web. 1. Potable water - standards. 2. Water - standards. 3. Water quality -standards. 4. Guidelines. I. Title. ISBN 92 4 154696 4 (NLM classification: WA 675) © World Health Organization 2021

Yamamoto, M., Tomita, J., Sakaguchi, A., Ohtsuka, Y., Hoshi, M., & Apsalikov, K. N. (2010). Uranium isotopes in well water samples as drinking sources in some settlements around the Semipalatinsk Nuclear Test Site, Kazakhstan. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 284(2), 309-314. <https://doi.org/10.1007/s10967-010-0463-2>

Zeinab M, Magda Abd El-Wahab, Nabil El-Faramawy, Determination of natural radioactive elements in Abo Zaabal, Egypt by means of gamma spectroscopy, *Annals of Nuclear Energy*, Volume 44, 2012, Pages 8-11, ISSN 0306-4549, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.01.003>.

Zhang M, Qureshi AA, Geller AC, Frazier L, Hunter DJ y Han J. Uso de camas de bronceado e incidencia de cáncer de piel. *J Clin Oncol* 30: 1588

Acarreador. Sustancia no radiactiva que en cantidades apreciables se asocia con el radionúclido de interés para transportarlo a través del proceso.

Actividad. Es el número de transiciones nucleares espontáneas que ocurren por unidad de tiempo en una cantidad dada de material radiactivo. Formalmente la actividad (A) de una cantidad dada de material radiactivo, es el cociente de dN entre dt siendo dN el número de transiciones nucleares espontáneas que ocurre en el intervalo dt . La unidad de actividad es el Becquerel (Bq) donde:

1Bq = 1 desintegración por segundo.

1 Ci = 3.7×10^{10} desintegraciones por segundo

Adsorción. Es una tendencia que tienen los iones ó moléculas en solución a agruparse sobre la superficie de un sólido.

Calibración de energía. Calcula dos grupos de parámetros: la energía contra el número de canal y la forma del pico o FWHM contra la energía

Concentración de actividad. Es la actividad de un radionúclido contenida en la unidad de masa o volumen de la muestra. Se expresa en Bq/g, Bq/L o Bq/mL

CPM. Cuentas por minuto, desintegraciones por minuto medidas por el sistema, que depende de la eficiencia del mismo para ello, esto es radiaciones que cuenta el detector en un minuto.

Criterios de Aceptación Parámetros bajo los cuales el resultado de una prueba será considerado aceptable.

Decaimiento radiactivo. Proceso de desintegración en donde los núcleos emiten

partículas o radiación electromagnética, perdiendo masa o energía nuclear.

Elución. Arrastre mediante un eluyente de los iones unidos a la resina de intercambio iónico.

Eluato. La solución que sale de la columna de intercambio iónico. También se le conoce como afluente.

Eluente o eluyente. Solución empleada para extraer una especie adsorbida en la resina de intercambio iónico.

Espectro. Se le denomina espectro (Spectrum) a la distribución (conteo de pulsos con respecto a su altura) arreglada en orden de energías ascendentes

Eventos. Son pulsos de señal que se originan de un detector y la característica de interés es la altura de pulso o voltaje, la cual es proporcional a la partícula o energía del fotón.

Exactitud. Aptitud del instrumento de medición para dar respuestas cercanas al valor verdadero o de referencia

Fuente abierta. Todo material radiactivo que durante su utilización puede entrar en contacto directo con el ambiente.

IAEA. Organismo Internacional de Energía Nuclear.

Incertidumbre. Parámetro asociado al resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuido al mensurando.

Instalaciones radiactivas. Son aquellas en donde se producen, fabrican, almacenan o usan fuentes radiactivas o dispositivos generadores de radiación ionizante, o en las que se tratan, acondicionan o almacenan desechos radiactivos. Estas instalaciones se clasifican como de tipo I y tipo II.

Intercambio iónico. Proceso que ocurre en una resina en la que se intercambian iones por otros de signo igual ó mayor.

ILD. Inferior al límite de Detección, resultado que cae entre el límite crítico y el límite de detección.

Límite Crítico. Actividad de la muestra que es menor al límite inferior de detección pero mayor al fondo.

Límite de cuantificación. Es la razón de conteo que puede distinguirse por arriba del fondo con una exactitud y precisión aceptable bajo las condiciones establecidas de la prueba

Límite de Detección. Es la razón de conteo que puede distinguirse por arriba del fondo indicando presencia de actividad, pero no en suficiente cantidad para cuantificarse bajo condiciones establecidas.

Límite inferior de detección. Es la cantidad mínima de material radiactivo que puede detectarse, por arriba del fondo.

Linealidad. Es la capacidad del instrumento para obtener la razón de conteo directamente proporcional a la actividad de la muestra en un rango definido de la misma.

Material radiactivo. Cualquier material que presente elementos que tengan el fenómeno de la radiactividad.

MCA. (MultiChannel Analyzer). Analizador multicanal. Es un instrumento que clasifica y cuenta eventos en tiempo real. Esta clasificación está basada en algunas características de los mismos.

MDA. (Minimum Detectable Activity) Actividad mínima detectable; es una medida de que tan pequeña la actividad podría presentarse y no detectarse por el análisis.

Meseta. Rango de voltaje en donde las ionizaciones producidas por las radiaciones (alfa y beta) dentro del detector se mantienen constantes. Es aquí donde se encuentra el voltaje de operación para el detector.

Partículas alfa. Siendo idénticas a un núcleo de un átomo de Helio. En el proceso de decaimiento alfa dos neutrones y dos protones se combinan dentro del núcleo y se emiten como una sola partícula compuesta; denominándose partícula alfa

Partículas beta. Emisiones nucleares de masa muy pequeña, equivalente a la del electrón. Cuando tienen carga negativa son llamadas negatrones (partículas betas negativas) y si tienen carga positiva son llamadas positrones (partículas betas positivas).

Plancheta. Se utilizan para las mediciones en el contador alfa y beta de bajo fondo; son platillos redondos de fondo plano, con un diámetro interno de 50 mm y un diámetro externo superior (borde) de 60 mm el material de composición de la plancheta es, por especificaciones, acero inoxidable.

Precisión. Es la dispersión de los valores de una serie repetida de conteos que se realizan sobre una muestra homogénea.

Radiactividad. Fenómeno de desintegración espontánea de un núcleo inestable que da como resultado una emisión de partículas o energía.

Radionúclido. Es un átomo cuyo núcleo es inestable, de las diferentes debido a que su proporción de neutrones es mayor o menor al número de protones por lo tanto dicho núcleo al tender hacia el equilibrio emitirá radiación en forma de ondas o partículas.

Radionúclido de vida media corta. Son aquellos cuya vida media es menor o igual a 30 años, incluyendo al Cesio-137.

Radionúclidos de vida media larga. Son aquellos cuya vida media es mayor a 30 años, excepto el Cesio-137.

Radiotoxicidad. Es la capacidad que tiene un radionúclido para producir una lesión en virtud de sus emisiones radiactivas, cuando es incorporado al cuerpo.

Repetibilidad. Refleja la precisión del instrumento cuando se desarrolla bajo las mismas condiciones, utilizando la misma muestra, analizada por el mismo analista en el mismo detector durante una misma sesión de trabajo en un periodo corto.

Reproducibilidad. Es la medida de la precisión de la razón de conteo realizados sobre la misma muestra homogénea, pero realizados por diferentes analistas en diferentes detectores y días diferentes se expresa con los mismos parámetros matemáticos de Repetibilidad.

Resina de intercambio iónico. Es un polímero orgánico que tiene grupos iónicos unidos en forma covalente, los cuales interaccionan en forma electrostática con iones móviles de signos opuestos.

Rutas de exposición. Son aquellas rutas a considerar, por las cuales un elemento radiactivo puede llegar al hombre.

Sensibilidad. Es el cambio en la respuesta de un instrumento de medición dividido por el correspondiente cambio del estímulo.

Verificación metrológica: a la aportación de la evidencia de que un elemento satisface los requisitos especificados.

Vida media. Es el tiempo necesario para que los átomos radiactivos se reduzcan a la mitad de la cantidad inicial.

Anexo 1 validación del sistema de conteo alfa y beta total

1. OBJETIVO

Presentar los resultados obtenidos tras la evaluación del desempeño del Sistema proporcional alfa beta de bajo fondo, utilizado en la determinación de la razón de conteo (cpm) empleada en el método de prueba cuantificación de la actividad alfa y beta total en agua, a fin de cumplir con los lineamientos señalados en el documento Compendio de criterios técnicos, y lineamientos para la calificación,

calibración, mantenimiento y verificación metrológica de los equipos e instrumentos empleados en la realización de pruebas analíticas.

2. CAMPO DE APLICACIÓN

Este reporte de evaluación de desempeño es aplicable a los dos Sistemas Proporcionales de Flujo alfa/beta de Bajo Fondo Canberra/Tennelec CR-001 y CR-002, empleado en el método citado con anterioridad.

3. EQUIPO

Sistema proporcional de flujo de bajo fondo Alfa/ Beta Canberra/ Tennelec modelo S5XLBPF/SERIES 5XLB DE CANBERRA y S5X2050ESERIES 5XLB DE CANBERRA NS 13000637 (CR1) y 0509773 (CR2) respectivamente.

4. MATERIALES

Plancheta metálica acanalada de acero inoxidable 5 cm de diámetro (2 pulgadas de diámetro X ¼ pulgada de altura), Plancheta de plástico con aro para montaje de filtro 5 cm de diámetro, Plástico autoadherible, Papel filtro Whatman No. 40 y 42, Papel filtro de fibra de vidrio, Papel filtro de membrana, Pinzas para filtros de bordes planos.

5. REACTIVOS

Fuente estándar radiactiva sellada electrodepositada de ^{90}Sr en plancheta metálica, Fuente estándar radiactiva sellada electrodepositada Trinúclido (Curio-244, Americio-241 y Plutonio-239), Gas P-10 Argón-metano, Fuente abierta de Am^{241} , soluciones estándar de trabajo de KCl y Am^{241} .

6. MUESTRAS

Dada las muestras y las condiciones con que éstas son analizadas, los aspectos que se evaluaron para caracterizar los sistemas proporcionales fue el estimar el

fondo de éstos con las matrices Blanco Alfa Beta Global, plancheta de plástico con papel filtro fibra de vidrio, plancheta metálica acanalada, empleadas en la cuantificación de la Actividad \cdot Total en Agua y Cuantificación de la Actividad α Total en Agua así como fondo en verificación de patrones. Empleados en los diferentes métodos y/o actividades.

7. METODOLOGIA

Cada uno de los sistemas cuenta con un solo detector de muestra de 5.7 cm de diámetro y una ventana de 80 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, sobre un detector de guarda. Contiene un intercambiador de muestras automático que permite una operación ininterrumpida de hasta 50 muestras mediante dos trenes de engranaje y mecanismos de sensores electrónicos que permiten leer el número del transportador de la muestra mediante código binario.

8. DESARROLLO EXPERIMENTAL

8.1. Efecto del tiempo de conteo en el fondo

Se realizó conteo de fondo con seis mediciones a las tres matrices expresadas en el apartado 6 de este anexo, en cada uno de los detectores a diferentes intervalos estudiados: 5, 10, 30, 60, 120 y 180 minutos, se obtuvieron los gráficos correspondientes a las cpm vs tiempo, e incertidumbre contra tiempo para cada detector tanto para alfa como beta.

Se tabularon y graficaron los resultados obtenidos, mismos que se presentan en el apartado 10.1.

9.2 Repetibilidad y Precisión intermedia

Para evaluar los parámetros de repetibilidad y de reproducibilidad o precisión intermedia se llevó a cabo treinta conteos de 1 minuto de manera consecutiva, así como 10 conteos de 60 minutos y de 120 minutos a fuentes estándar de radiación

alfa y beta en ambos sistemas de detección proporcionales de bajo fondo, a fin de evaluar también la reproducibilidad teniendo como condicionante el equipo.

Descargar los resultados obtenidos en la base de datos correspondiente y determinar la repetibilidad y precisión intermedia en términos de la desviación estándar relativa de la repetibilidad RSDr y de la precisión intermedia la RSDpi respectivamente, mediante el uso de las siguientes fórmulas:

$$RSDr = \frac{sr}{\bar{x}} * 100 \quad \text{dónde } Sr \text{ es igual a:}$$

$$sr = \sqrt{MS_d}$$

RSDr= Desviación estándar relativa de la repetibilidad

[(MS)] _d= Promedio de los cuadrados dentro de grupos de la Tabla de ANOVA

x = Promedio o media de los datos

sr=Desviación estándar de la repetibilidad

$$RSDpi = \frac{spi}{\bar{x}} * 100$$

$$spi = \sqrt{sr^2 + si^2}$$

$$si = \sqrt{\frac{|MS_e - MS_d|}{n}}$$

RSDpi= Desviación estándar relativa de la reproducibilidad o precisión intermedia

spi= Desviación estándar de la reproducibilidad o precisión intermedia

si= Desviación estándar de la imprecisión

MS_e= Promedio de los cuadrados entre grupos de la Tabla de ANOVA

MS_d= Promedio de los cuadrados dentro de grupos de la Tabla de ANOVA

\bar{x} = Promedio o media de los datos

n= número de datos

9.3 Intervalo lineal

9.3.1. Para alfas

Para evaluar este parámetro se contaron evaporados de disoluciones preparadas por triplicado de diferentes concentraciones que van desde 0.128 hasta 2.6 Bq/L, del nivel 1 al 6, a partir de la disolución de trabajo de AM241_1_1, cuya concentración de radiactividad era de 1.326 Bq/mL, estos evaporados se realizaron en planchetas acanaladas y se llevaron a conteo en cada uno de los detectores con un tiempo de conteo de 60 minutos y se graficó la actividad contra respuesta del detector en cpm y se les aplicó la función estadística de correlación lineal por mínimos cuadrados.

9.3.2 Para Betas

En el caso de la evaluación de este parámetro para el conteo de radiación beta en ambos sistemas proporcionales de bajo fondo se emplearon las disoluciones preparadas en 500mL de agua para 6 niveles de concentración de radiactividad beta, desde 0.093 hasta 4.631 Bq/L con el material de referencia de KCl y

realizando los cálculos de contenido de radiactividad por triplicado de la disolución de trabajo. Se graficaron los valores de la respuesta analítica (cpm) obtenidas (eje y) en función de cada uno de los valores de la concentración de actividad (Bq/L) de los niveles de concentración estudiados (eje x). Se comprobó la linealidad de datos.

Se calculó la pendiente (m) y la ordenada al origen (b) y con estos datos se determinó el valor de la respuesta analítica ajustada (y') para cada valor de concentración empleando la siguiente ecuación:

$$y' = mx + b$$

Se calculó para cada nivel de concentración, los valores residuales (diferencia entre el valor de la respuesta analítica obtenida) (y) y el valor calculado por medio de la curva ajustada (y').

Se reportó el intervalo lineal obtenido en las unidades de la respuesta analítica (cpm).

10. RESULTADOS

Efecto del tiempo de conteo en las cpm e incertidumbre del fondo Blanco alfa beta total con tiempos de conteo de 5, 10, 30, 60, 120 y 180 minutos en el fondo

Tabla 15. Valores promedio de conteo alfa y beta e incertidumbre a diferentes intervalos de tiempo en blanco alfa/beta en detectores CR-1y CR-2



CONTEO ALFA	Blanco Alfa Beta				CONTEO ALFA	Promedio				CONTEO BETA	Blanco Alfa Beta				CONTEO BETA	Promedio			
	CR-001		CR-002			CR-001		CR-002			CR-001		CR-002			CR-001		CR-002	
	CONTEO	INC	CONTEO	INC		CONTEO	INC	CONTEO	INC		CONTEO	INC	CONTEO	INC		CONTEO	INC	CONTEO	INC
MINUTOS	Alfa(CR001)	Alfa(CR001)	Alfa(CR002)	Alfa(CR002)	MINUTOS	Alfa(CR001)	Alfa(CR001)	Alfa(CR002)	Alfa(CR002)	MINUTOS	Beta(CR001)	Beta(CR001)	Beta(CR002)	Beta(CR002)	MINUTOS	Beta(CR001)	Beta(CR001)	Beta(CR002)	Beta(CR002)
Fecha/Batch	14/04/2021-Batch: 2655				14/04/2021-Batch: 3046				14/04/2021-Batch: 2655				14/04/2021-Batch: 3046						
5	0.20	0.20	0.20	0.20	5.0	0.07	0.07	0.07	0.07	5	1.00	0.45	0.40	0.28	5.0	0.73	0.37	0.30	0.22
5	0.20	0.20	0.00	0.00	10.0	0.05	0.05	0.17	0.11	5	0.40	0.28	0.00	0.00	10.0	0.70	0.26	0.67	0.25
5	0.00	0.00	0.00	0.00	30.0	0.07	0.05	0.06	0.04	5	1.00	0.45	0.20	0.20	30.0	0.57	0.14	0.68	0.15
5	0.00	0.00	0.00	0.00	60.0	0.05	0.03	0.08	0.04	5	0.40	0.28	0.40	0.28	60.0	0.65	0.10	0.65	0.10
5	0.00	0.00	0.20	0.20	120.0	0.06	0.02	0.06	0.02	5	1.20	0.49	0.60	0.35	120.0	0.65	0.08	0.70	0.08
5	0.00	0.00	0.00	0.00	180.0	0.07	0.02	0.06	0.02	5	0.40	0.28	0.20	0.20	180.0	0.67	0.06	0.66	0.06
Fecha/Batch	16/04/2021-Batch: 2662				15/04/2021-Batch: 3051				16/04/2021-Batch: 2662				15/04/2021-Batch: 3051						
10	0.00	0.00	0.20	0.14						10	0.30	0.17	0.70	0.26					
10	0.10	0.10	0.30	0.17						10	0.90	0.3	0.80	0.28					
10	0.10	0.10	0.00	0.00						10	0.90	0.3	0.80	0.28					
10	0.00	0.00	0.30	0.17						10	0.60	0.24	0.60	0.24					
10	0.00	0.00	0.10	0.10						10	1.10	0.33	0.50	0.22					
10	0.10	0.10	0.10	0.10						10	0.40	0.2	0.60	0.24					
Fecha/Batch	14/04/2021-Batch: 2656				14/04/2021-Batch: 3048				14/04/2021-Batch: 2656				14/04/2021-Batch: 3048						
30	0.10	0.06	0.00	0.00						30	0.57	0.14	0.90	0.17					
30	0.13	0.07	0.03	0.03						30	0.43	0.12	0.73	0.16					
30	0.03	0.03	0.07	0.05						30	0.73	0.16	0.53	0.13					
30	0.07	0.05	0.03	0.03						30	0.43	0.12	0.70	0.15					
30	0.03	0.03	0.13	0.07						30	0.63	0.15	0.73	0.16					
30	0.03	0.03	0.10	0.06						30	0.60	0.14	0.47	0.12					
Fecha/Batch por detector ->>				Alfa-beta CR-002				Alfa-beta CR-001				<<-Fecha/Batch por detector							
60	0.10	0.04	0.07	0.03	08/04/2021	3023	07/04/2021	2639	60	0.63	0.10	0.62	0.10						
60	0.03	0.02	0.10	0.04	12/04/2021	3030	08/04/2021	2643	60	0.73	0.11	0.73	0.11						
60	0.08	0.04	0.05	0.03	15/04/2021	3040	12/04/2021	2647	60	0.57	0.10	0.10	0.10						
60	0.03	0.02	0.13	0.05	20/04/2021	3052	15/04/2021	2659	60	0.65	0.10	0.70	0.11						
60	0.05	0.03	0.07	0.03	21/04/2021	3064	20/04/2021	2669	60	0.52	0.09	0.57	0.10						
60	0.02	0.02	0.05	0.03	27/04/2021	3071	21/04/2021	2676	60	0.78	0.11	0.67	0.11						
Fecha/Batch	16/04/2021-Batch: 2663				16/04/2021-Batch: 3059				16/04/2021-Batch: 2663				16/04/2021-Batch: 3059						
120	0.06	0.02	0.03	0.02						120	0.73	0.08	0.71	0.08					
120	0.06	0.02	0.07	0.02						120	0.68	0.08	0.77	0.08					
120	0.10	0.03	0.07	0.02						120	0.61	0.07	0.76	0.08					
120	0.03	0.02	0.08	0.03						120	0.60	0.07	0.61	0.07					
120	0.05	0.02	0.06	0.02						120	0.61	0.07	0.74	0.08					
120	0.03	0.01	0.04	0.02						120	0.68	0.08	0.62	0.07					
Fecha/Batch	23/04/2021-Batch: 2682				23/04/2021-Batch: 3077				23/04/2021-Batch: 2682				23/04/2021-Batch: 3077						
180	0.09	0.02	0.06	0.02						180	0.64	0.06	0.63	0.06					
180	0.05	0.02	0.08	0.02						180	0.71	0.06	0.57	0.06					
180	0.06	0.02	0.04	0.02						180	0.61	0.06	0.72	0.06					
180	0.07	0.02	0.02	0.01						180	0.71	0.06	0.64	0.06					
180	0.04	0.01	0.07	0.02						180	0.59	0.06	0.68	0.06					
180	0.09	0.02	0.06	0.02						180	0.75	0.06	0.72	0.06					

Fig.20. Comportamiento del promedio de conteo alfa e incertidumbre a diferentes intervalos de tiempo en blanco alfa beta en ambos detectores.

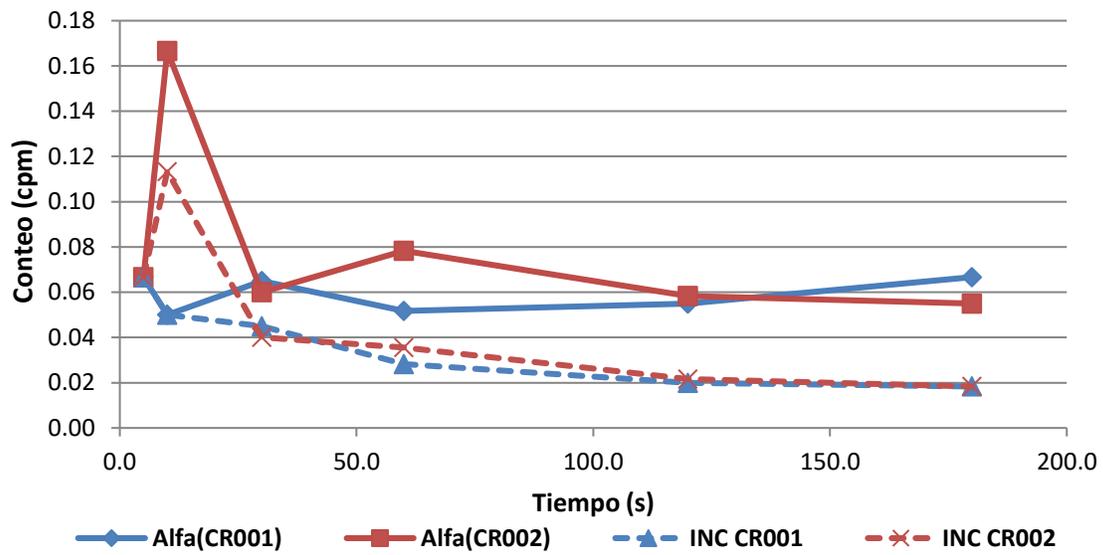
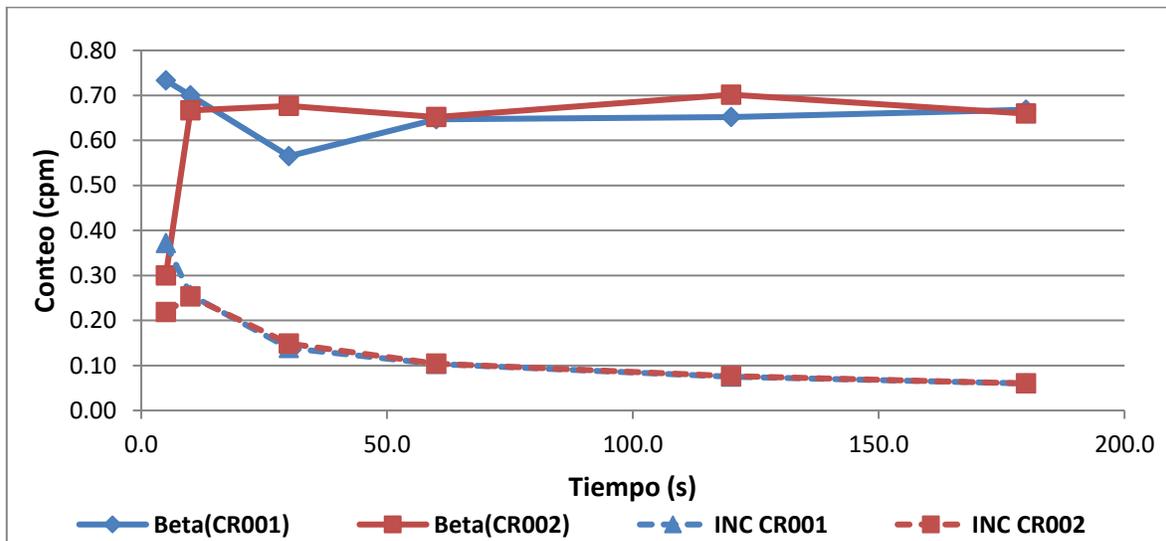


Fig.21 Comportamiento del promedio de conteo beta e incertidumbre a diferentes intervalos de tiempo en blanco alfa beta en ambos detectores.



Fuente:

10.2 Fondo de plancheta acanalada

Efecto del tiempo de conteo 5,10,30,60,120, y 180 minutos con plancheta acanalada

Tabla 16. Valores promedio de conteo alfa y beta e incertidumbre a diferentes intervalos de tiempo 5,10,30,60,120, y 180 minutos con plancheta acanalada en CR-1y CR-2

CONTEO ALFA	Plancheta Metálica acanalada				CONTEO ALFA	Promedio				CONTEO BETA	Plancheta Metálica Acanalada				CONTEO BETA	Promedio			
	CR-001		CR-002			CR-001		CR-002			CR-001		CR-002			CR-001		CR-002	
	CONTEO	INC	CONTEO	INC		CONTEO	INC	CONTEO	INC		CONTEO	INC	CONTEO	INC		CONTEO	INC	CONTEO	INC
MINUTOS	Alfa(CR001)	Alfa(CR001)	Alfa(CR002)	Alfa(CR002)	MINUTOS	Alfa(CR001)	Alfa(CR001)	Alfa(CR002)	Alfa(CR002)	MINUTOS	Beta(CR001)	Beta(CR001)	Beta(CR002)	Beta(CR002)	MINUTOS	Beta(CR001)	Beta(CR001)	Beta(CR002)	Beta(CR002)
Fecha/Batch	14/04/2021-Batch: 2655		14/04/2021-Batch: 3046		5.0	0.07	0.07	0.17	0.13	Fecha/Batch	14/04/2021-Batch: 2655		14/04/2021-Batch: 3046		5.0	0.57	0.33	0.93	0.37
5	0.00	0.00	0.60	0.35	10.0	0.08	0.07	0.03	0.03	5	0.60	0.35	2.80	0.75	10.0	0.47	0.21	0.95	0.30
5	0.00	0.00	0.20	0.20	30.0	0.04	0.03	0.11	0.06	5	0.80	0.40	0.40	0.28	30.0	0.54	0.13	0.80	0.16
5	0.00	0.00	0.20	0.20	60.0	0.05	0.03	0.04	0.02	5	0.60	0.35	0.40	0.28	60.0	0.51	0.09	0.64	0.10
5	0.00	0.00	0.00	0.00	120.0	0.07	0.02	0.06	0.02	5	0.20	0.20	1.20	0.49	120.0	0.62	0.07	0.65	0.08
5	0.20	0.20	0.00	0.00	180.0	0.05	0.02	0.04	0.02	5	0.80	0.40	0.00	0.00	180.0	0.59	0.06	0.64	0.06
5	0.20	0.20	0.00	0.00						5	0.40	0.28	0.80	0.40					
Fecha/Batch	16/04/2021-Batch: 2662		15/04/2021-Batch: 3051							Fecha/Batch	16/04/2021-Batch: 2662		15/04/2021-Batch: 3051						
10	0.10	0.10	0.00	0.00						10	0.40	0.2	1.70	0.41					
10	0.10	0.10	0.00	0.00						10	0.60	0.24	1.20	0.35					
10	0.20	0.14	0.10	0.10						10	0.20	0.14	0.50	0.22					
10	0.10	0.10	0.00	0.00						10	0.20	0.14	0.90	0.30					
10	0.00	0.00	0.00	0.00						10	0.70	0.26	0.70	0.26					
10	0.00	0.00	0.10	0.10						10	0.70	0.26	0.70	0.26					
Fecha/Batch	14/04/2021-Batch: 2656		14/04/2021-Batch: 3048							Fecha/Batch	14/04/2021-Batch: 2656		14/04/2021-Batch: 3048						
30	0.00	0.00	0.07	0.05						30	0.67	0.15	1.43	0.22					
30	0.03	0.03	0.13	0.07						30	0.60	0.14	0.77	0.16					
30	0.10	0.06	0.17	0.07						30	0.57	0.14	0.67	0.15					
30	0.03	0.03	0.10	0.06						30	0.50	0.13	0.63	0.15					
30	0.07	0.05	0.13	0.07						30	0.47	0.12	0.73	0.16					
30	0.03	0.03	0.03	0.03						30	0.43	0.12	0.57	0.14					
Fecha/Batch	31/03/2021-Batch: 2620		26/03/2021-Batch: 3048							Fecha/Batch	31/03/2021-Batch: 2620		26/03/2021-Batch: 3048						
60	0.10	0.04	0.02	0.02						60	0.62	0.10	0.80	0.12					
60	0.08	0.04	0.07	0.03						60	0.48	0.09	0.68	0.11					
60	0.03	0.02	0.08	0.04						60	0.67	0.11	0.68	0.11					
60	0.05	0.03	0.03	0.02						60	0.53	0.09	0.63	0.10					
60	0.03	0.02	0.02	0.02						60	0.43	0.08	0.52	0.09					
60	0.02	0.02	0.00	0.00						60	0.33	0.07	0.53	0.09					
Fecha/Batch	19/04/2021-Batch: 2665		19/04/2021-Batch: 3061							Fecha/Batch	19/04/2021-Batch: 2665		19/04/2021-Batch: 3061						
120	0.10	0.03	0.09	0.03						120	0.53	0.07	0.76	0.08					
120	0.07	0.02	0.08	0.03						120	0.68	0.08	0.74	0.08					
120	0.02	0.01	0.06	0.02						120	0.52	0.07	0.69	0.08					
120	0.07	0.02	0.06	0.02						120	0.67	0.07	0.54	0.07					
120	0.12	0.03	0.03	0.02						120	0.59	0.07	0.59	0.07					
120	0.03	0.02	0.03	0.02						120	0.72	0.08	0.59	0.07					
Fecha/Batch	31/03/2021-Batch: 2622		26/03/2021-Batch: 2992							Fecha/Batch	31/03/2021-Batch: 2622		26/03/2021-Batch: 2992						
180	0.06	0.02	0.03	0.01						180	0.64	0.06	0.68	0.06					
180	0.04	0.01	0.06	0.02						180	0.56	0.06	0.58	0.06					
180	0.06	0.02	0.01	0.01						180	0.52	0.05	0.64	0.06					
180	0.06	0.02	0.04	0.02						180	0.63	0.06	0.61	0.06					
180	0.02	0.01	0.05	0.02						180	0.56	0.06	0.66	0.06					
180	0.03	0.01	0.04	0.02						180	0.6	0.06	0.67	0.06					

Fig. 22 Comportamiento del promedio de conteo alfa e incertidumbre a diferentes intervalos de tiempo en plancheta metálica acanalada en ambos detectores.

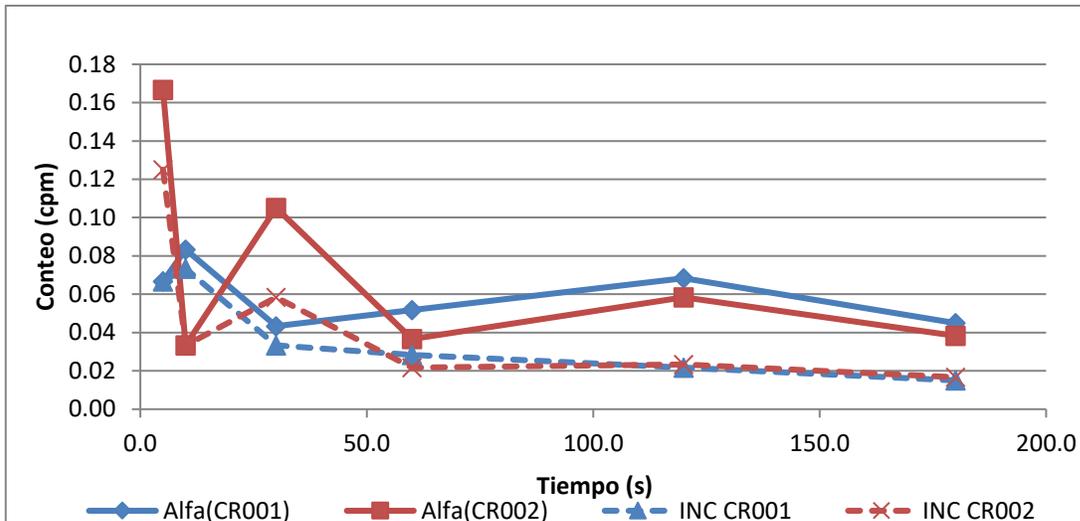
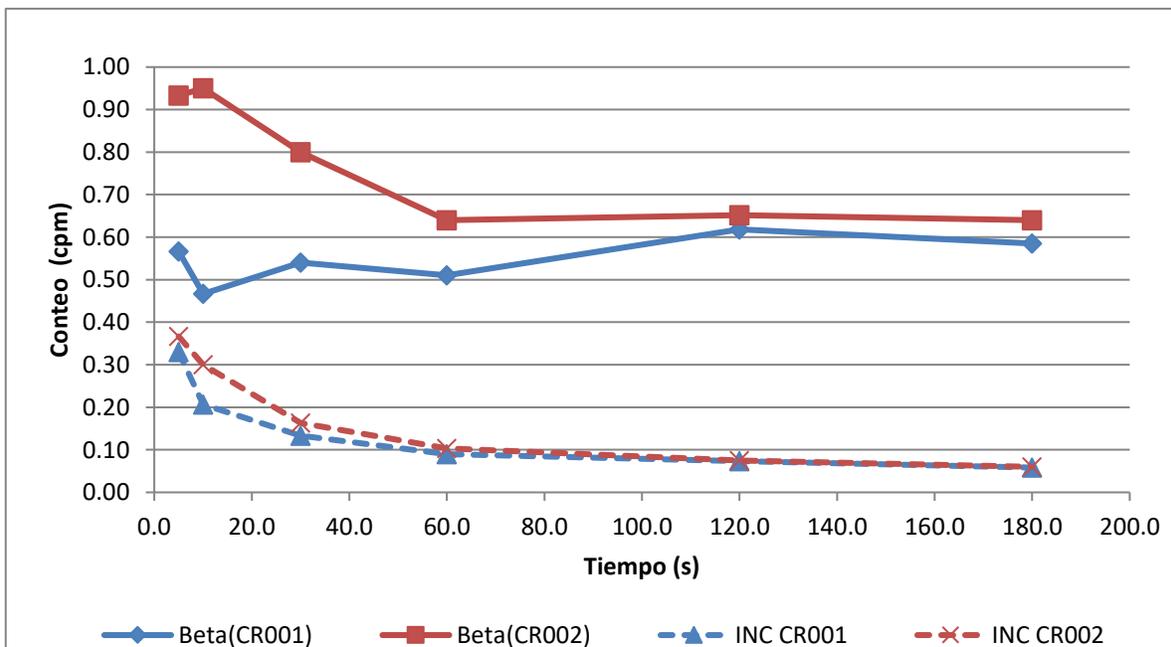


Fig.23. Comportamiento del promedio de conteo beta e incertidumbre a diferentes intervalos de tiempo en plancheta metálica acanalada en ambos detectores.



10.3 Repetibilidad y reproducibilidad(equipo) o precisión intermedia

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al contar fuentes estándar de radiación alfa y beta por 1, 60 y 120 minutos en ambos sistemas de detección proporcionales de bajo fondo para evaluar el parámetro de repetibilidad y reproducibilidad cuya condición de variable es el equipo:

10.3.1 Para conteo alfa de 1 minuto. Con una fuente estándar sellada trinúclido

Tabla 17 Conteos de 1 minuto con fuente estándar sellada Trinuclido

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN			
CR001		CR002	
9449	9689	9553	9705
9444	9615	9591	9410
9595	9407	9573	9592
9478	9396	9637	9612
9554	9612	9417	9628
9386	9626	9394	9486
9378	9601	9507	9600
9470	9496	9512	9511
9483	9389	9648	9563
9612	9443	9501	9517
9571	9431	9666	9776
9546	9523	9507	9732
9410	9515	9692	9706
9353	9545	9480	9557
9613	9605	9467	9629

Análisis de Varianza con un Sr alfa de un valor de 169.068, Si 52.79, Sip de 313.93, RSDRalfa de 3.29 CVr alfa 1.77

10.3.2 Para conteo beta de 1 minuto. Repetibilidad/Reproducibilidad o precisión intermedia con fuente estándar sellada de estroncio 90

Tabla 18 conteos de 1 minuto con fuente estándar sellada de estroncio 90

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN			
CR001		CR002	
17108	16972	17531	17514
17183	17111	17878	17582
17030	17277	17629	17571
17367	17123	17652	17795
17241	16920	17709	17726
17109	16176	17667	17625
17084	17269	17702	17443
17010	17230	17717	17629
17114	17035	1772	17805
16979	17144	17431	17708
16941	17050	17499	17886
17350	17359	17570	17768
17336	17033	17658	17886
17212	17281	17644	17793
17134	17113	17747	17661

Análisis de Varianza con valores para Sr 312.45, Si de 496.27, Sip de 1039.4 RSD
pi Beta 5.97, RSDr CVr beta 1.79

10.3.3 Para conteo alfa de 60 minutos con fuente estándar sellada trinuclido y evaluar la repetibilidad/reproducibilidad o precisión intermedia

Tabla 19 conteos de 60 minutos con fuente estándar sellada trinuclido alfa

CR-001 (cpm)		CR-002 (cpm)	
9555.25	9547.23	9577.68	9555.35
9566.2	9554.87	9574.12	9548.27
9551.00	9572.03	9568.55	9580.18
9566.00	9551.98	9580.68	9564.4
9571.68	9563.73	9570.42	9561.38

Análisis de Varianza con valores para Sr 18.13, Si de 3.05, Sip de 32.59 RSDRalfa 0.34, RSDr alfa CVr alfa 0.189

10.3.4 Para conteo beta de 60 minutos, evaluando la repetibilidad/reproducibilidad o precisión intermedia con una fuente sellada de estroncio 90.

Tabla 20 conteos de 60 minutos con fuente estándar sellada de estroncio 90

CR-001 (cpm)		CR-002 (cpm)	
17054.95	17024.07	17602.37	17574.48
17062.77	17038.88	17576.58	17608.12
17044.62	17061.68	17606.35	17595.45
17033.40	17025.47	17584.47	17583.55
17048.23	17019.73	17584.78	17609.67

Análisis de Varianza con valores para Sr 25.82, Si de 488.45, Sip de 866.97 RSDpi beta 5.006, RSDr beta CVr beta 0.149

10.3.5 Para Conteo alfa de 120 minutos, , evaluando la repetibilidad/reproducibilidad o precisión intermedia con una fuente sellada trinuclido.

Tabla 21 conteos de 120 minutos con fuente estándar sellada Trinuclido

CR-001 (cpm)	CR-002 (cpm)
9570.05	9587.55
9547.81	9581.69
9541.97	9563.75
9554.87	9578.58
9564.65	9592.53
9545.12	9557.28
9563.44	9567.9
9562.18	9577.75
9544.07	9564.7
9525.96	9562.3

Análisis de Varianza con valores para Sr 23.14, Si de 12.36, Sip de 21.91 RSDalfa 0.0229, RSDr alfa CVr 0.024

10.3.6 Para Conteo beta de 120 minutos, evaluando la repetibilidad/reproducibilidad o precisión intermedia con una fuente sellada de estroncio 90.

Tabla 22 conteos de 120 minutos con fuente estándar sellada de estroncio 90

CR-001 (cpm)	CR-002 (cpm)
17218.57	17557.55
17173.93	17534.34
17188.17	17529.87

CR-001 (cpm)	CR-002 (cpm)
17177.61	17530.43
17188.80	17515.07
17190.28	17527.66
17215.32	17531.79
17218.07	17533.36
17238.96	17545.07
17199.78	17529.80

Análisis de Varianza con valores para Sr 29.78, Si de 170.10, Sip de 306.09
RSDpibeta 0.97, CVr 0.1714

10.4 Intervalo lineal

10.4.1 Para alfa en Sistema CR-001, usando una matriz de agua con unidades de Bq/L

Tabla 23 Respuesta analítica de intervalo lineal con 6 niveles, fuente alfa

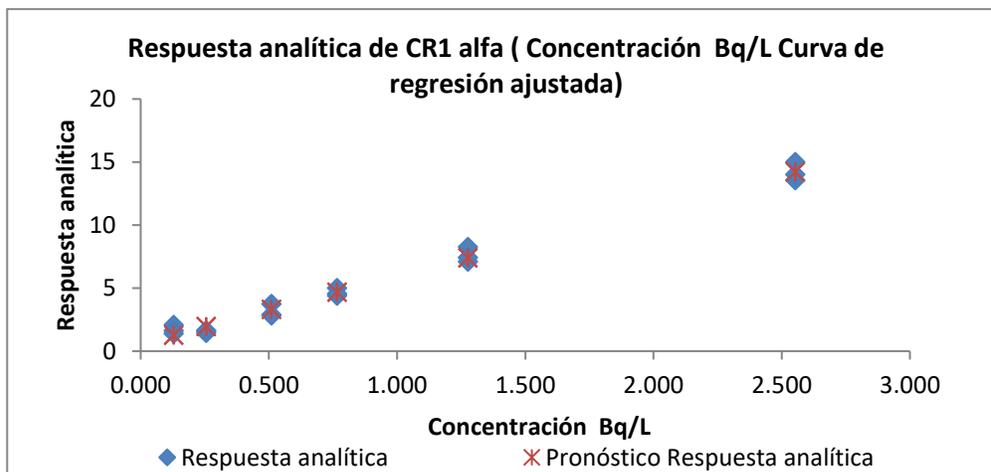
Nivel	Clave de la muestra	Concentración Bq/L	Respuesta analítica
N1	113/CR/1/MI/21	0.128	2.08
	112/CR/1/MI/21	0.128	1.62
	111/CR/1/MI/21	0.128	1.40
N2	110/CR/1/MI/21	0.255	1.63
	109/CR/1/MI/21	0.255	1.45
	108/CR/1/MI/21	0.255	1.62
N3	105/CR/1/MI/21	0.510	2.83
	106/CR/1/MI/21	0.510	2.87
	107/CR/1/MI/21	0.510	3.75
N4	104/CR/1/MI/21	0.766	5.00
	103/CR/1/MI/21	0.766	4.40
	102/CR/1/MI/21	0.766	4.55

Nivel	Clave de la muestra	Concentración Bq/L	Respuesta analítica
N5	101/CR/1/MI/21	1.276	7.10
	100/CR/1/MI/21	1.276	8.25
	099/CR/1/MI/21	1.276	7.43
N6	096/CR/1/MI/21	2.552	13.55
	097/CR/1/MI/21	2.552	15.00
	098/CR/1/MI/21	2.552	14.02

Coeficiente de correlación múltiple 0.99, coeficiente de determinación 0.98, error típico 0.49 con 18 observaciones.

Con un modelo matemático $Y=5.343 X+0.5888$ $R^2=0.98$

Fig.24 Respuesta analítica de CR-1 alfa con modelo matemático de ajuste

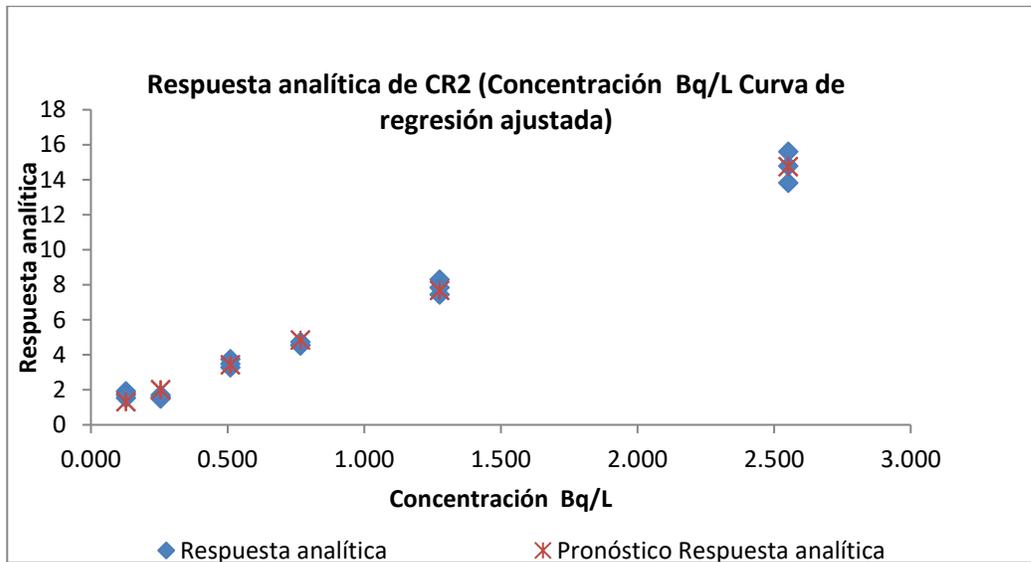


10.4.2 Para alfa en Sistema CR-002

Para alfa en Sistema CR-002, usando una matriz de agua con unidades de Bq/L utilizando los 6 niveles de concentración de actividad de 0.128,0.255,0.510, 0.766, 1.276, 2.552 Bq/L por triplicado se obtiene un modelo matemático de $Y=5.5442X+0.5965$ con un coeficiente de determinación de $R^2=0.9906$, un coeficiente de correlación múltiple de 0.9952 y un error típico de 0.47 con 18

observaciones

Fig.25 respuesta analítica de CR-2 alfa con modelo matemático de ajuste



10.4.3 Para beta en Sistema CR-001, se estima el intervalo lineal en una matriz de agua, en unidades de Bq/L con 6 niveles de concentración por triplicado con 0.093,0.185,0.463,0.925,2.314,4.627. siendo 18 observaciones

Tabla 24 Respuesta analítica de intervalo lineal con 6 niveles, fuente beta

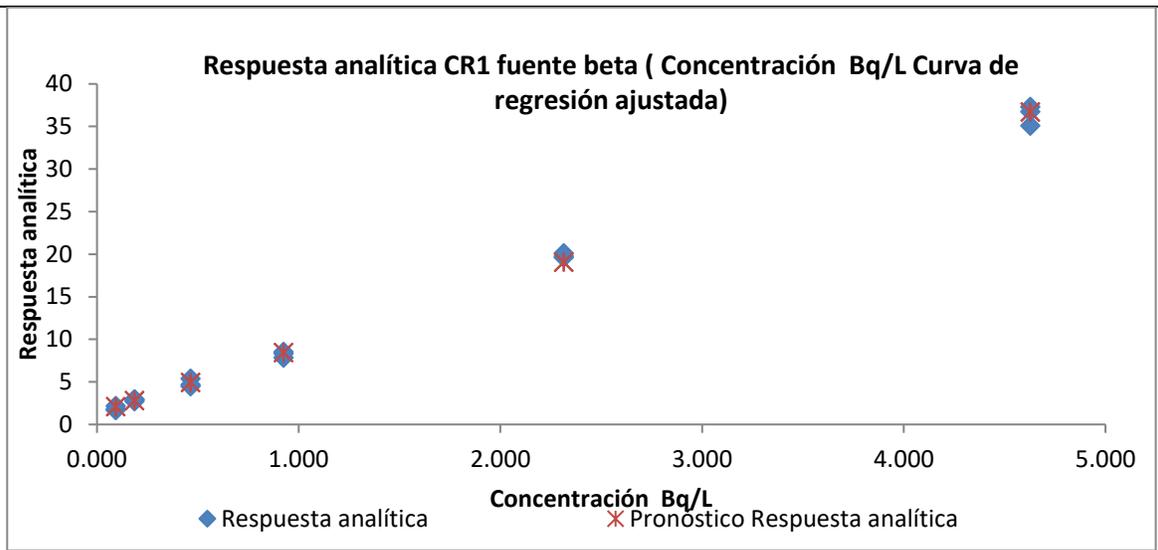
Nivel	Clave de la muestra	Concentración Bq/L	Respuesta analítica
N1	022/CR/1/MI/21	0.093	1.68
	023/CR/1/MI/21	0.093	1.8
	024/CR/1/MI/21	0.093	2.15

N2	019/CR/1/MI/21	0.185	2.93
	020/CR/1/MI/21	0.185	2.72
	021/CR/1/MI/21	0.185	2.95
N3	016/CR/1/MI/21	0.463	5.37
	017/CR/1/MI/21	0.463	4.48
	018/CR/1/MI/21	0.463	4.67
N4	031/CR/1/MI/21	0.925	7.83
	032/CR/1/MI/21	0.925	8.52
	033/CR/1/MI/21	0.925	8.32
N5	028/CR/1/MI/21	2.314	19.60
	029/CR/1/MI/21	2.314	19.78
	030/CR/1/MI/21	2.314	20.12
N6	025/CR/1/MI/21	4.627	35.07
	026/CR/1/MI/21	4.627	36.72
	027/CR/1/MI/21	4.627	37.30

Obteniendo un coeficiente de correlación de 0.99 un coeficiente de determinación 0.99 y un error típico de 0.081 y 18 observaciones, con un modelo matemático de ajuste $Y=7.6332X+1.3841$ $R^2=0.99$.

Respuesta para CR1 incrementando la concentración de actividad beta

Fig.26 respuesta analítica del CR-1 con fuente beta y curva ajustada



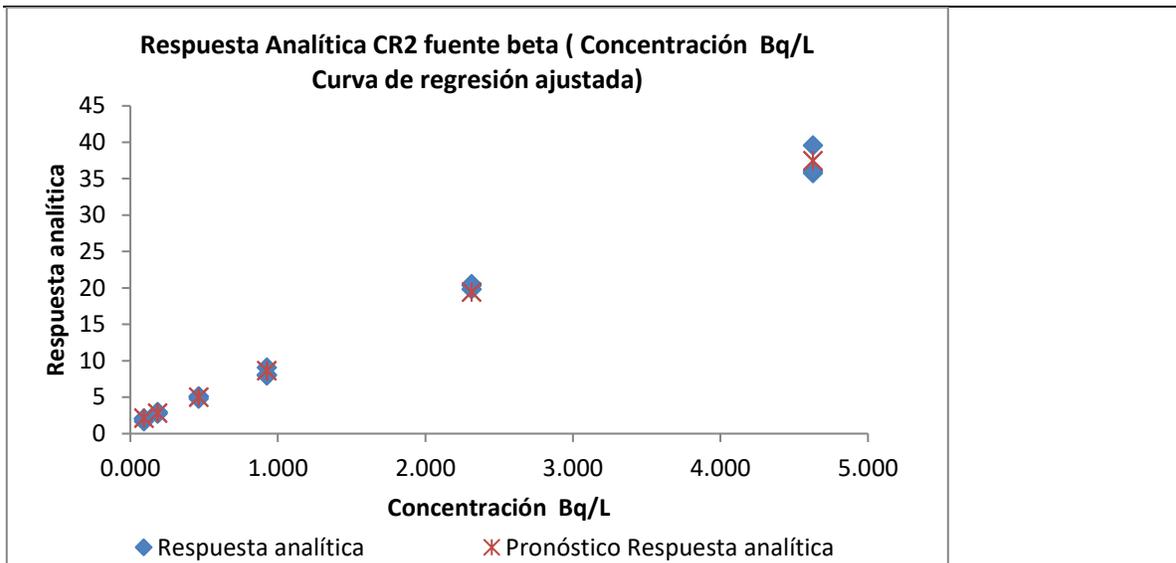
10.4.4 Para beta en Sistema CR-002

Para beta en Sistema CR-002, se estima el intervalo lineal en una matriz de agua, en unidades de Bq/L con 6 niveles de concentración por triplicado con 0.093,0.185,0.463,0.925,2.314,4.627. siendo 18 observaciones

Obteniendo un coeficiente de correlación de 0.99 un coeficiente de determinación 0.99 y un error típico de 0.88 y 18 observaciones, con un modelo matemático de ajuste $Y=7.7972X+1.4038$ $R^2=0.99$.

Respuesta del sistema CR-2 incrementando la Concentración de actividad de radiación beta

Fig.27 Respuesta analítica del CR-2 con fuente beta y curva ajustada



11. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Efecto del tiempo de conteo en las alfas (cpm) e incertidumbre del fondo

Tabla 25 Conteos Alfa en CR-1 y CR-2 en diferentes geometrías

TIEMPO MINUTOS	ALFAS					
	BLANCO ALFA BETA		PLANCHETA METÁLICA ACANALADA		FIBRA DE VIDRIO	
	CR-001	CR-002	CR-001	CR-002	CR-001	CR-002
5	0.07	0.07	0.07	0.17	0.10	0.00
10	0.05	0.17	0.08	0.03	0.08	0.02
30	0.07	0.06	0.04	0.11	0.05	0.08
60	0.05	0.08	0.05	0.04	0.07	0.06
120	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.05
180	0.07	0.06	0.05	0.04	0.06	0.06

Tabla 26 Conteos Beta en CR-1 y CR-2 en diferentes geometrías

TIEMPO MINUTOS	BETAS					
	BLANCO ALFA BETA		PLANCHETA METÁLICA ACANALADA		FIBRA DE VIDRIO	
	CR-001	CR-002	CR-001	CR-002	CR-001	CR-002
5	0.73	0.30	0.57	0.93	1.70	1.70
10	0.70	0.67	0.47	0.95	1.68	2.08
30	0.57	0.68	0.54	0.80	1.85	1.95
60	0.65	0.65	0.51	0.64	1.70	1.88
120	0.65	0.70	0.62	0.65	1.73	1.74
180	0.67	0.66	0.59	0.64	1.80	1.81

Como resultado del conteo de fondo en las diversas geometrías evaluadas (alfa beta global, plancheta metálica acanalada, papel filtro de fibra de vidrio) se observa en las diferentes gráficos que a cortos tiempos de conteo se tiene en ambos detectores y para las diversas geometrías una mayor dispersión de los resultados sobre todo a tiempos de conteo inferiores a 60 minutos, y por ende las incertidumbres en dichos tiempos son mayores. Es notorio también observar como a partir de ese tiempo las diferentes curvas tanto para alfa como para beta se hace casi planas, por lo que a partir de allí no se consiguen cambios sustanciales en la respuesta.

El fondo de las diferentes geometrías tanto para alfa como para beta se observa muy similar a tiempos de conteo de sesenta minutos en adelante. Actualmente es 60 y 120 minutos los tiempos de conteo más empleados en ambos sistemas de medición.

En el caso del fondo para beta la geometría que mostró los conteos más altos fue la de fibra de vidrio.

11.2 Repetibilidad y reproducibilidad (precisión intermedia)

Concentrado de resultados de repetibilidad y reproducibilidad o precisión intermedia (equipo)

Tabla 27 Resumen de repetibilidad y reproducibilidad alfa beta a diferentes tiempos.

	ALFA			BETA		
	1 minuto	60 minutos	120 minutos	1 minuto	60 minutos	120 minutos
RSD _{r alfa}	1.772	0.189	0.023	1.796	0.149	0.171
RSD _{R alfa}	3.290	0.340	0.053	5.977	5.006	0.979

Los resultados obtenidos para ambos parámetros demuestran valores por debajo del 6%, incluso en el 83% de los resultados se obtienen valores por debajo del 3.5% y en 75% de ellos es inferior al 2%.

11.3 Intervalo lineal

11.3.1. Para Alfa

Se observa en los gráficos No. 14 y 17 correspondientes al comportamiento de la respuesta de los sistemas de medición CR-001 y CR-002 ante la detección de

incrementos en la concentración de radiación alfa cuantificada con ellos, que a medida que aumenta la concentración aumenta el número de cuentas obtenidas, para ambos detectores se tienen gráficos con comportamiento lineal

Tabla 28 intervalo lineal para alfa en los equipos con valores de correlación

<i>Estadísticas de la regresión</i>	ALFA	
	<i>CR-001</i> <i>ALFA</i>	<i>CR-002</i> <i>ALFA</i>
Coefficiente de correlación múltiple	0.994	0.995
Coefficiente de determinación R^2	0.988	0.990
R^2 ajustado	0.987	0.990
Error típico	0.498	0.470
Observaciones	18	18

11.3.2 Para Beta

Al igual que en alfa, se observa en los gráficos No. 20 y 23 correspondientes al comportamiento de la respuesta de los sistemas de medición CR-001 y CR-002 ante la detección de incrementos en la concentración de radiación beta cuantificada con ellos, que a medida que aumenta la concentración aumenta el número de cuentas obtenidas, para ambos detectores se tienen gráficos con comportamiento lineal.

Tabla 29 intervalo lineal para beta en los equipos con valores de correlación

<i>Estadísticas de la regresión</i>	BETA	
	<i>CR-001</i> <i>BETA</i>	<i>CR-002</i> <i>BETA</i>
Coefficiente de correlación múltiple	0.998	0.997
Coefficiente de determinación R ²	0.997	0.995
R ² ajustado	0.997	0.995
Error típico	0.621	0.888
Observaciones	18	18

11.4 Límites de detección y límite de Cuantificación

Tabla 30 Resumen de los límites de detección y cuantificación para alfa y beta en Varias geometrías.

	ALFA				BETA			
	LD	LC	LD	LC	LD	LC	LD	LC
	CR001	CR001	CR002	CR002	CR001	CR001	CR002	CR002
BLANCO								
ALFA BETA	0.17	0.31			1.05			
TOTAL			0.21	0.38		1.53	1.43	2.19
PLANCHETA METALICA	0.24	0.43	0.22	0.39	1.13	1.73	1.22	1.77
PAPEL FILTRO FIBRA DE VIDRIO	0.21	0.39	0.21	0.38	2.39	3.14	2.64	3.56
Promedio	0.21	0.38	0.21	0.38	1.52	2.13	1.76	2.51
desv	0.04	0.06	0.01	0.01	0.75	0.88	0.77	0.94
c.v	16.99	16.22	2.71	1.51	49.34	41.13	43.47	37.34

A continuación, se presenta las tablas resumen de los límites de detección (LD) y cuantificación (LC) del conteo de radiación alfa y beta en las diferentes matrices de fondo empleadas a un tiempo de conteo de 60 y 120 minutos para ambos sistemas de detección CR-001 y CR-002.

Los límites de detección para el conteo de radiación alfa en las matrices de fondo empleadas (alfa beta total, plancheta metálica, papel filtro fibra de vidrio, fue en promedio de 0.21 cpm y el de cuantificación de 0.38 cpm con valores de cuentas muy similares entre ellas tanto para el Sistema de detección CR-001 como para el Sistema CR-002, pero si se observaron en este último sistema de detección que fueron ligeramente más altos dando un promedio de 0.29 cpm, ligeramente más alto que el CR-001, y al igual que en el CR-001 los valores muy similares entre las diversas matrices empleadas, el límite de cuantificación fue de 0.38 cpm; todas ellas para un tiempo de conteo de 60 minutos.

Tabla 31 límite de detección y cuantificación a 60 y 120 minutos con fuente beta en varias geometrías.

			60		120	
			MINUTOS		MINUTOS	
RADIACIÓN BETA	BLANCO ALFA BETA TOTAL	CR-001	LD	1.05	LD	1.00
			LC	1.53	LC	1.43
		CR-002	LD	1.43	LD	1.18
			LC	2.19	LC	1.69
	PLANCHETA METALICA	CR-001	LD	1.13		
			LC	1.73		
		CR-002	LD	1.22		
			LC	1.77		
	PAPEL FILTRO FIBRA DE VIDRIO	CR-001	LD	2.39		
			LC	3.14		
CR-		LD	2.64			

		002	LC	3.56
--	--	-----	----	------

Por lo que respecta a los límites de detección para el conteo de radiación beta se observó que la matriz del fondo de papel filtro de fibra de vidrio fue del doble (2.39 cpm para el sistema de detección CR-001 y 2.64 cpm para el CR-002) que el obtenido en las otras matrices (alfa beta total, plancheta metálica) el CR-002. En relación a los límites de cuantificación en papel fibra de vidrio las cuentas obtenidas fueron de 3.14 y 3.56 cpm en sistema de detección CR-001 y CR-002.

El límite de detección y cuantificación para la detección de la radiación alfa es casi el mismo en ambos sistemas a 120 minutos de conteo, como puede observarse en la siguiente tabla:

Tabla 32 límite de detección y cuantificación en el CR-1 y CR-2 para la geometría blanco alfa beta total con una fuente alfa.

	ALFA			
	LD	LC	LD	LC
	CR001	CR001	CR002	CR002
BLANCO ALFA BETA TOTAL	0.14	0.25	0.14	0.24

En el caso del límite de detección y cuantificación en el conteo de la radiación beta a 120 minutos en la geometría empleada es también muy similar en ambos sistemas de detección.

Tabla 33 límite de detección y cuantificación en el CR-1 y CR-2 para la geometría blanco alfa beta total con una fuente beta.

	BETA			
	LD CR001	LC CR001	LD CR002	LC CR002
BLANCO ALFA BETA	1.00	1.43	1.18	1.69

TOTAL				
-------	--	--	--	--

11.5 ROBUSTEZ

Resultados de la $F_{calculada}$ y $F_{crítica}$ del análisis de Varianza en la respuesta de los sistemas a tasas altas y bajas de conteo entre los flujos de operación estudiados

Tabla 34 Análisis de varianza de los conteos realizados a tasas alfa y beta de conteo

	ALFA		BETA	
	CR-001	CR-002	CR-001	CR-002
Tasa Alta de conteo, $F_{calculada}$	2.170	0.337	2.721	2.327
Tasa Baja de conteo, $F_{calculada}$	0.743	0.866	0.696	0.769
$F_{crítica}$	2.86626			

11.6.1 A tasas de conteo altas con tiempos cortos de conteo

Como puede observarse en el análisis de varianza tanto para el sistema de detección CR 001 como para el CR-002 a tasas altas de conteo en la detección de radiación alfa y beta no se encontraron diferencias significativas en la respuesta de ambos instrumentos en los flujos operación de gas p-10 estudiados (25, 20, 15 y 10 sccm).

11.6.2 A tasas de conteo bajas con tiempos de conteo 60 minutos

A tasas de conteo bajas tampoco se observan diferencias significativas de los resultados obtenidos para cada uno de los cuatro flujos de operación estudiados pues todos los valores de la $F_{calculada}$ son inferiores a la $F_{crítica}$.

11.6 ESPECIFICIDAD

Para la evaluación de este parámetro se consideró el % de traslape y que para el caso de determinar las betas que se van al canal alfa, con una fuente de radiación electrodepositada de Sr90 se reprodujo la especificación en la que se declara que el traslape de las betas en el canal alfa debe ser menor e igual al 0.1 %, y como puede observarse se cumple con dicha especificación en ambos sistemas. Sin embargo es importante señalar que para el caso de las alfas que se van al canal beta, dado que no se cuenta con una fuente de Po210, se empleó una fuente de evaporado directo de una disolución de Am241 en plancheta acanalada y se observó porcentajes promedio de traslape del orden del 20% para ambos sistemas de detección esto debido tal vez a que la fuente de Americio-241 es tanto alfa como gamma. Este porcentaje de traslape se da como información no es posible comparar la respuesta a este parámetro con una fuente que no es la especificada.

Tabla 35 Promedio del conteo como porcentaje de traslape en CR-1 y CR-2

	Promedio del porcentaje de traslape			
	Betas en el canal alfa		Alfas en el canal beta	
	CR-001	CR-002	CR-001	CR-002
PROMEDIO	0.0811	0.1018	21.8	23.3

12. Discusión de los resultados

Tabla 36 Resumen de los resultados obtenidos y los criterios de aceptación.

Parámetro	Prueba	Resultado obtenido	Criterio de aceptación
Voltaje de Operación	Meseta Alfa	CR-001: 585/- 1.08%, 600/1.92%; CR-002: 585/3.39%, 600/1.5%	300-600 VOLTS/ \leq 2.5% Definido por el fabricante

Parámetro	Prueba	Resultado obtenido	Criterio de aceptación
	Meseta Beta	CR-001:1425/1.59%, 1425/1.99% CR-002: 1432/3.93%,1432/0.49%	1350-1470 volts/≤2.5% Definido por el fabricante
Fondo	Efecto del tiempo de conteo en las cpm e incertidumbre del fondo	Tiempos de conteos menores de 60 minutos, presentan más dispersión en las cuentas obtenidas. Alfa 0.02 cpm, Beta 0.1cpm Para las diversas geometrías estudiadas, excepto Beta FV 0.25 cpm A mayores tiempos de conteos incertidumbres más bajas.	Alfa ≤0.05 cpm Beta ≤0.75 cpm Definidos por el fabricante
Fondo ...continuación	Determinación de fondos (cpm) por matriz	<i>A 60 minutos de conteo</i> *Alfa: CR001= 0.05; *Beta: CR001=0.62 CR002 =0.05; CR002=0.75 <i>Para fibra de vidrio</i> BETA: CR001=1.74 CR002=1.84 A 120 minutos	Especificaciones garantizadas por el fabricante: Alfa ≤ 0.05 cpm Beta ≤ 0.75

Parámetro	Prueba	Resultado obtenido	Criterio de aceptación
		Alfa: CR001= 0.04; #Beta: CR001=0.61 CR002 =0.05; CR002=0.72	
Intervalo lineal	<p>Gráfico de linealidad</p> <p>Gráficos de la respuesta de ambos sistemas de medición CR-001 y CR-002 que muestran que ante incrementos en la concentración de radiación alfa responden con incrementos en las cpm detectadas.</p> <p>Verificación de visual de comportamiento lineal en el gráfico de respuesta analítica contra concentración.</p>		
Repetibilidad	RSD _r	Alfas: 1 m = 1.8; 60 m = 0.19; 120 m= 0.02 Betas: : 1 m = 1.8; 60 m = 0.15; 120 m= 0.17	
Precisión intermedia	RSD _R	Alfas: 1 m = 3.29; 60 m = 0.34; 120 m= 0.05 Betas: : 1 m = 5.98; 60 m = 5.00; 120 m= 0.97	
Intervalo de trabajo	Coeficiente de correlación	Alfas: 0.9945 Betas: 0.9975	0.98 a 1.00
	Intervalo de confianza de la pendiente		Debe incluir el valor de la Unidad

(*) Alfa beta total, papel filtro whatman, plancheta metálica, papel filtro fibra de vidrio.

(#)Alfa beta total, Papel filtro whatman

Como resultado de la actual evaluación o calificación del desempeño se concluye que:

A partir de 60 minutos de conteo la respuesta analítica en cpm de ambos sistemas de detección se alcanzan respuestas con menor dispersión de los datos y por tanto una menor incertidumbre.

Se comprobó en ambos sistemas que el intervalo evaluado es lineal en la respuesta, es decir al aumentar la radiactividad a detectar aumentan las cuentas detectadas dando coeficientes de correlación de 0.99, y observándose en gráficos aleatoriedad en los puntos por arriba y debajo de la recta.

Los niveles de radiación alfa de fondo oscilan de 0.05 cpm para ambos sistemas de detección en las diferentes geometrías empleadas tanto a 60 como 120 cpm, mientras que para la radiación beta es de 0.6 cpm para las diversas geometrías, valores dentro de lo marcado

en las especificaciones del fabricante que garantiza menor e igual 0.05 cpm para alfa y menor e igual a 0.6 cpm para beta. No cumpliéndose para el papel de fibra de vidrio que en promedio dió 1.7 cpm por la naturaleza del mismo material.

Los límites de detección son para Alfa ≤ 0.05 cpm en todas las geometrías estudiadas, tanto a 60 como 120 minutos; sin embargo para los mismos tiempos para beta fue en promedio ≤ 0.75 cpm para las geometrías estudiadas, excepto para la de fibra de vidrio que por su naturaleza dio valores superiores a 1 cpm.

En cuanto a los límites de cuantificación son para Alfa < 0.4 cpm en todas las geometrías estudiadas, tanto a 60 como 120 minutos; sin embargo para los mismos tiempos para beta fue en promedio ≤ 2 cpm para las geometrías estudiadas, excepto para la de fibra de vidrio que por su naturaleza dio valores del orden de 3 cpm

La repetibilidad tanto para el conteo de radiación alfa como Beta a 1 minuto es menor al 2%; para 60 y 120 minutos; mientras que para 60 y 120 minutos no rebasa el 0.2%.

La precisión intermedia o reproducibilidad (teniendo como condicionante el instrumento) es del orden del 3% para alfa y de aproximadamente 6% para beta a un tiempo de conteo de 1 minuto; mientras que de 0.3 y 5% para alfa y beta de 60 minutos respectivamente, del mismo modo para 120 minutos fue de 0.05 y 1.0% para alfa y beta.

Del estudio de ver la respuesta analítica del instrumento con diferentes flujos de operación (10,15, 20 y 25 sccm) se concluye que NO existe diferencia significativa en el conteo tanto de radiación alfa beta a tasas altas y bajas cuando se emplean diferentes flujos de operación. Por tanto el flujo de operación podrá ser entre ese rango.

En el parámetro de especificidad se pudo comprobar que ambos sistemas cumplen en cuanto al porcentaje de traslape observado al someter a conteo una fuente beta de ^{90}Sr , en donde las cuentas de betas que se detectan en el canal alfa no rebasan el 0.1%.; mientras que para las alfas que se leen como beta es del orden del 20% con una fuente de americio evaporado en plancheta metálica acanalada que no es con la que garantiza el fabricante un traslape del 0.1%.

La interpretación de los resultados vienen integrados dentro de la metodología para los parámetros siguientes; precisión (repetibilidad), linealidad, efecto del tiempo de conteo en el fondo, límite de detección y cuantificación para determinaciones beta, traslape, robustez, precisión (reproducibilidad) dando con ello un mayor entendimiento y claridad en la interpretación de los mismos para estas pruebas.

12. CONCLUSIÓN (VALIDEZ DE LA PRUEBA)

Por los resultados obtenidos en parámetros evaluados a ambos sistemas de detección se concluye que se ajusta su uso para el que fue propuesto.

Anexo 2 Superficie estatal por grupo de suelo dominante

Superficie estatal por grupo de suelo dominante (Porcentaje)

Suelo dominante		Características	Clave textural	Total
Clave	Nombre			
AC	Acrisol	Suelos con arcillas de baja actividad y que no son fértiles en general para la agricultura. Muy susceptibles a la erosión por deforestación y remoción de raíces. Los Acrisoles son representativos de zonas muy lluviosas. Se caracterizan por sus colores rojos o amarillos claros con manchas rojas y por ser muy ácidos.	1,2,3	100.00 3.73
AN	Andosol	Suelos de origen volcánico reciente y que son muy ligeros en peso debido al abundante alófono o complejos aluminio -humus en los primeros 30 cm de profundidad. Tienen una consistencia grasosa o resbaladiza. Si bien los Andosoles son fáciles de cultivar y tienen buenas propiedades de enraizamiento y almacenamiento de agua, cuando están situados en ladera es preferible conservarlos bajo su vegetación original. Presentan valores superiores en promedio a 3.0% de carbono orgánico y se erosionan rápidamente por deforestación y remoción de raíces. Los Andosoles mexicanos son particularmente frágiles debido a que en su mayoría están situados en regiones con cambios drásticos en el uso del suelo.	1,2,3	5.19
AR	Arenosol	Suelos con más del 85% de arena. Incluyen arenas recién depositadas en dunas o playas también de arenas residuales formadas por meteorización de sedimentos o rocas ricas en cuarzo. No tienen buenas propiedades de almacenamiento de agua y nutrientes, pero ofrecen facilidad de labranza y enraizamiento. Los Arenosoles más susceptibles a la degradación por cambio de uso son los de clima húmedo.	1	1.74
CL	Calcisol	Suelos con más del 15% de carbonato de calcio en por lo menos una capa de 15 cm de espesor. Muchos cultivos en Calcisoles tienen éxito si son fertilizados además con nitrógeno, fósforo, hierro y zinc. Es uno de los grupos de suelo más extendidos en el país.	2,3	0.75
CM	Cambisol	Suelos jóvenes con algún cambio apreciable en el contenido de arcilla o color entre sus capas u horizontes de suelo. Son suelos que no tienen un patrón climático definido pero que pueden encontrarse en alguna posición geomorfológica intermedia entre cualquiera de dos grupos de suelo considerados por la WRB. Tienen en el subsuelo una capa más parecida a suelo que a roca y con acumulaciones moderadas de calcio, fierro, manganeso y arcilla. Son de moderada a alta susceptibilidad a la erosión.	1,2,3	4.53
CH	Chemozem	Suelos de clima árido o semiárido, con una capa superficial gruesa, negra o muy oscura y rica en carbono orgánico, fértiles en magnesio, potasio y carbonatos en el subsuelo. La mayor parte de los Chernozems se encuentran en clima semicálido seco o semiseco (BS0, BS1) y se emplean en la agricultura de riego o temporal, en el cultivo de pastizales.	2,3	0.31



Suelo dominante		Características	Clave textural	Total
Clave	Nombre			
FL	Fluvisol	Suelos con abundantes sedimentos fluviales, marinos o lacustres en periodos recientes y que están ubicados tradicionalmente sobre planicies de inundación, abanicos de ríos o marismas costeras. Tienen buena fertilidad natural y son atractivos históricamente para los asentamientos humanos de nuestro país. Los Fluvisoles con influencia de marea son suelos ecológicamente valiosos en los que la vegetación original debe preservarse.	1,2,3	0.91
GL	Gleysol	Suelos propios de humedales y que bajo condiciones naturales están afectados por agua subterránea en los primeros 50 cm de profundidad. Presentan manchas azul –verdosas o negruzcas que denotan presencia de sulfuro de hierro o metano. También presentan manchas rojas en el período seco cuando los agregados son expuestos al aire y el fierro es oxidado. El encalado y el drenaje combinados son prácticas que aumentan la disponibilidad de nutrientes y carbono orgánico, así como disminuyen la toxicidad por aluminio en el suelo.	1,2,3	5.89
LP	Leptosol	Anteriormente se conocían como Litosoles, del griego Lithos, piedra. Actualmente representan a suelos con menos de 25 cm de espesor o con más de 80% de su volumen ocupado por piedras o gravas. Son muy susceptibles a la erosión por las diversas actividades humanas.	1,2,3	5.47
LV	Luvisol	Suelos rojos, grises o pardos claros, susceptibles a la erosión especialmente aquellos con alto contenido de limo y los situados en pendientes fuertes. Los Luvisoles son generalmente fértiles para la agricultura. Son el quinto grupo de suelos más extendido sobre nuestro país.	1,2,3	19.15
NT	Nitisol	Suelos tropicales profundos, intensamente rojos o amarillos, con arcillas de alta capacidad de retención de humedad y con agregados brillantes fuertemente estructurados. Pueden ser los suelos más productivos de los trópicos húmedos. Por su profundidad y capacidad de enraizamiento son moderadamente estables frente a la erosión.	3	0.27
PH	Phaeozem	Suelos de clima semiseco y subhúmedo, tipos BS1, (A)C y Aw0, de color superficial pardos a negro, fértiles en magnesio, potasio, aunque sin carbonatos en el subsuelo. El relieve donde se desarrollan estos suelos es generalmente plano o ligeramente ondulado.	1,2,3	11.33
RG	Regosol	Suelos con propiedades físicas o químicas insuficientes para colocarlos en otro grupo de suelos. Son pedregosos, de color claro en general y se parecen bastante a la roca que les ha dado origen cuando no son profundos.	1,2,3	7.09



SC	Solonchak	Suelos con enriquecimiento en sales fácilmente solubles en algún momento del año, formadas en ambientes de elevada evapotranspiración. Las sales son apreciables cuando el suelo está seco y en la mayoría de las veces precipitan en la superficie formando una costra de sal. Las sales afectan la absorción de agua por las plantas y afectan el metabolismo del nitrógeno. Algunos métodos de control son el riego y uso de yeso combinado.	1,3	0.23
UM	Umbrisol	Suelos oscuros y ácidos en la superficie, de clima húmedo o subhúmedo, en ambiente montañoso principalmente. Son susceptibles a la erosión por efecto de la deforestación del bosque o selva donde es localizado comúnmente.	1,2,3	2.24
VR	Vertisol	Suelos pesados bajo condiciones alternadas de saturación - sequía, con grietas anchas, abundantes y profundas cuando están secos y con más de 30% de arcillas expandibles. Mediante un buen programa de labranza y drenaje estos suelos son bastante fértiles para la agricultura por su alta capacidad de retención de humedad y sus propiedades de intercambio mineral con las plantas. Las obras de construcción asentadas sobre estos suelos deben tener especificaciones especiales para evitar daños por movimiento o inundación. Son bastantes estables frente a la erosión.	2,3	24.68
Otro a/				6.49

<3/3>

Nota: En la columna de clave textural, la clave 1 corresponde al nombre de gruesa, la 2 a media y la 3 a fina. Los porcentajes se calcularon con las fuentes originales sin generalizar.

a/ No se representa en el mapa de suelos dominantes, ya que es la sumatoria de varios tipos de suelo con áreas mínimas no cartografiadas.

Fuente: INEGI. *Continuo Nacional del Conjunto de Datos Vectorial Edafológico Escala 1:250 000, serie II.*
INEGI. *Guía para la Interpretación de la Cartografía Edafológica Escala 1:250 000, serie II.*



ARENOSOL (AR)



ACRISOL (AC)



VERTISOL (VR)



LUVISOL (LV)



PHAEOZEM (PH)

Cartas Edafológicas INEGI 2021