

Historia de una vocación nuclear 1965 - 2025

Modesto Montoya

Email: mmontoya@uni.edu.pe

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Rímac, Lima, Perú

Publicado el 23 de enero de 2025

<https://doi.org/10.33017/HCP20250001>

Resumen

Como practicante de electricidad en la Planta Siderúrgica de Chimbote en la década de 1960, me interesé en la generación de energía eléctrica en la Central Hidroeléctrica del Cañón del Pato. En 1962, supe de la visita de Robert Oppenheimer al Perú, quien vino a promover el uso de la energía nuclear. En 1965, llegué a la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) el físico nuclear Víctor Latorre, procedente de Estados Unidos. En 1967, ingresé a la UNI para seguir la carrera de física nuclear, realizando mi tesis de bachiller bajo su dirección. En 1974, obtuve el grado de magíster en ciencias por la UNI, tras lo cual fui nombrado docente en esa universidad. El 4 de febrero de 1975, se creó el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) con el propósito de desarrollar la energía nuclear en el Perú.

Ante las perspectivas nucleares del Perú, decidí partir a Francia para seguir un doctorado en física nuclear en el Instituto de Física Nuclear (IPN) de Orsay. En 1977, obtuve el grado de doctor de tercer ciclo en física nuclear y física de partículas, y en 1981, el grado de doctor de Estado, con una tesis sobre fisión nuclear.

En 1982, ingresé al IPEN y, en 1984, publiqué el primer artículo de esta institución en una revista indexada en Scopus. Sin embargo, ese mismo año fui despedido por los militares que dirigían la institución, debido a mi apoyo a las demandas de un mejor trato para los científicos. Durante mi exilio forzado, trabajé como investigador invitado en el Centro de Investigación de Iones Pesados (GSI) de Darmstadt (Alemania), el Centro Nacional de Investigación Científica, (CNRS) de Francia y el Instituto Carnegie Mellon (CMI) de Pittsburgh (Estados Unidos).

En 1988, el doctor Víctor Latorre fue designado presidente del IPEN, lo que permitió mi retorno a la institución. Desde entonces he participado en investigaciones sobre fisión nuclear y aplicaciones y he sido testigo del desarrollo de importantes trabajos realizados por los científicos del IPEN en el uso de la técnica de huellas de fisión, el análisis por activación neutrónica y la producción de radioisótopos.

1. Introducción

En este trabajo, luego de relatar cómo el autor inició su interés en el tema de la energía nuclear y su ingreso como investigador al IPEN, se presenta una revisión de los artículos publicados por esta institución en revistas indexadas en la base de datos bibliográfica Scopus. Este análisis permite evaluar la producción científica y el potencial de esa institución para contribuir al desarrollo del Perú. Se usa la base de datos Scopus porque ésta ha sido seleccionada por el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (CONCYTEC) como fuente para evaluar la

producción científica de los investigadores nacionales y para su incorporación al Registro Nacional Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (RENACYT).

La clasificación de las publicaciones por disciplina de investigación ofrece una visión del potencial de desarrollo del IPEN en los campos que la involucran. Esto es fundamental para identificar y apoyar las líneas de investigación con mayor capacidad de aportar al desarrollo del país.

2. Orígenes de una vocación nuclear

Entre 1961 y 1965 estudié electricidad en el Instituto Nacional de Educación Industrial (INEI) N° 36 de Chimbote, actualmente conocido como Politécnico Nacional del Santa. En ese periodo sucedió una serie de eventos que forjaron mi vocación nuclear. La primera experiencia que recuerdo está asociada con mis prácticas pre-técnicas en el taller de electricidad de la Planta Siderúrgica de Chimbote. Esta planta fue construida con la participación de una empresa francesa e inaugurada en 1956. La energía eléctrica que alimentaba su funcionamiento provenía principalmente de la Central Hidroeléctrica del Cañón del Pato, que utilizaba las aguas del río Santa, en la zona de Huallanca. Esta central fue construida por la empresa francesa Compagnie Générale de Travaux Hydrauliques e inaugurada en 1958. Como estudiante de electricidad, quedé impresionado por las dimensiones del taller eléctrico, que reflejaban el tamaño y las necesidades energéticas de la planta siderúrgica, las que eran cubiertas en gran parte por la mencionada planta hidroeléctrica. Motivado por mi curiosidad sobre la historia de la central hidroeléctrica, el ingeniero jefe del taller me explicó que las ideas y propuestas iniciales para su construcción provinieron del sabio Santiago Antúnez de Mayolo. Este visionario no solo promovió el uso de la energía eléctrica, sino que también dictaba conferencias sobre física nuclear desde la década de 1920.

El año 1962 fue especialmente significativo. Robert Oppenheimer, director del Proyecto Manhattan que desarrolló la primera bomba atómica en Estados Unidos, recibió un Doctorado Honoris Causa de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). En ese entonces, el rector de la UNI era el ingeniero Mario Samamé Boggio. Además, Oppenheimer visitó Lima nuevamente el 23 de febrero de 1964 para participar en la VI Conferencia Interamericana de Consejos Universitarios como representante de la Universidad de Princeton.

Las noticias sobre estos eventos reforzaron mi interés en la física nuclear. Cuando en una clase de Castellano nos asignaron redactar un ensayo sobre un tema libre, escribí el artículo titulado "Desde la piedra hasta la bomba nuclear", obteniendo la máxima calificación.

En diciembre de 1965, al concluir mis estudios de técnico electricista, se me asignó una beca completa para estudiar como interno en el Politécnico José Pardo de Lima. Desde el inicio del año académico 1966 en el José Pardo, mis preguntas a los profesores solían ser respondidas con frases como: "Eso es física, no técnica". Esta situación me llevó a preguntar durante las clases dónde podía estudiar física. Fue entonces cuando el profesor de física me indicó que la UNI contaba con una Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, donde enseñaba el doctor Víctor Latorre, un físico nuclear que había regresado tras doctorarse en la Universidad de Maryland, Estados Unidos.

Sin dudar, respondí: “Me voy para allá”. Uno de mis compañeros, sorprendido, exclamó: “¿Y de qué vas a vivir?”. Mi respuesta fue espontánea: “Supongo que no moriré de hambre, pero estudiaré lo que me gusta”.

3. Entre la física nuclear y la relatividad

En 1966, el doctor Víctor Latorre fue coautor, junto con físicos de la Universidad de Maryland, de un artículo sobre la sección eficaz de la reacción $^{12}\text{C}(p, p)^{12}\text{C}$ utilizando protones en un rango de energías entre 1.48 y 2.02 MeV y a varios ángulos de dispersión en el sistema de centro de masa. Este trabajo reportó resonancias para ciertos valores de energía de los protones en su interacción con el ^{12}C , calculó parámetros más precisos para estas resonancias y analizó las anomalías observadas en 1.7 MeV [1].

Ese mismo año, el doctor Latorre, en colaboración con investigadores de la Universidad de Maryland, midió la sección eficaz diferencial de la dispersión elástica de protones en núcleos de ^{13}C , dentro de un rango de energías de 1.0 a 2.6 MeV y a ciertos ángulos de dispersión en el sistema de centro de masa. Los datos experimentales fueron ajustados mediante una fórmula de dos niveles en todo el rango energético, con la cual se identificaron siete resonancias conocidas [2].

En 1967, ya en la UNI, me concentré mucho en mis estudios y, como resultado, obtuve calificaciones tales que, al final del año, el doctor Latorre me propusiera que, en lugar de tomar vacaciones en Chimbote, asistiera al curso de Mecánica, correspondiente al tercer año de estudios. Este curso me permitió comprender mejor cómo calcular las trayectorias de partículas que interactúan con energías potenciales centrales, como sucede cuando las partículas se acercan a los núcleos antes de colisionar con ellos.

En 1971, por sugerencia del doctor Latorre, inicié mi carrera docente como ayudante alumno. Ese mismo año, comencé a trabajar en mi tesis de bachiller. Bajo su dirección y utilizando una computadora IBM 1130, adquirida por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), calculé las trayectorias de partículas alfa que incidían sobre núcleos de oro con diferentes parámetros de impacto. Estas trayectorias eran graficadas sobre rollos de papel por un graficador asociado con la computadora.

Ese año también fui seleccionado, junto con Francisco Bartra (ingresante en 1964) y Juan Vega Lino (ingresante en 1965), como uno de los tres alumnos beneficiados con una beca de la Fundación Ford para realizar estudios de maestría en física en la Escuela de Posgrado de la UNI.

A mediados de 1973, inicié mi tesis de maestría, enfocada en la teoría de la unificación del campo electromagnético con el campo gravitacional, bajo la dirección del profesor José del Prado, quien había estudiado en Rusia. Para abordar este problema, utilicé el formalismo cronométricamente invariante, desarrollado por el físico ruso Abraham Zelmanov en 1944. Este formalismo matemático se empleaba para estudiar las cantidades observables en la teoría general de la relatividad.

En mi tesis, apliqué este formalismo para relacionar las cantidades observables en la teoría unificada del campo electromagnético y el campo gravitacional, propuesta por Albert Einstein en 1951. Las ecuaciones derivadas sugerían la fascinante posibilidad de que variaciones en los campos electromagnéticos pudieran generar campos gravitacionales. Esta idea resultaba

especialmente interesante, ya que las ecuaciones independientes de ambos campos indicaban que sus ondas respectivas viajaban a la misma velocidad, al igual que el campo magnético y el campo eléctrico en las ecuaciones de Maxwell. Esto me llevó a considerar la posibilidad de que el campo gravitacional pudiera propagarse junto con estas ondas, como resultado de sus respectivas variaciones e interacciones entre ellas.

Finalmente, el 29 de mayo de 1974, presenté mi tesis titulada "Análisis cronométricamente invariante de la teoría unitaria del campo no simétrico". Dado que se trataba de una de las primeras tesis de maestría en la UNI, su sustentación se realizó en la sala del Consejo Universitario. El jurado estuvo presidido por el ingeniero César Sotillo, rector de la UNI, quien, aunque no era físico, encabezó el evento debido a la relevancia que se le otorgaba al grado de magíster en ciencias. Los demás miembros del jurado fueron el ingeniero Carlos del Río director de la Escuela de Posgrado (y que luego sería decano de nacional del Colegio de Ingenieros del Perú y presidente del CONCYTEC); el doctor Víctor Latorre; el ingeniero Holguer Valqui; el ingeniero Gerardo Ramos; y mi asesor, el profesor José del Prado.

4. La creación del IPEN y los planes nucleares del Perú

El 4 de febrero de 1975 se creó el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), con el encargo de promover, coordinar y controlar el desarrollo de la energía nuclear y sus aplicaciones en el país. En ese contexto, tres jóvenes oficiales de la Marina de Guerra del Perú llegaron a la UNI para ser evaluados y completar los requisitos necesarios para ser admitidos en universidades extranjeras, donde estudiarían temas relacionados con la energía nuclear. Me enteré de que la Marina del Perú tenía el objetivo de adquirir un submarino nuclear, según la propuesta del contralmirante Fernando D'Alessio, quien era director de Calificación de la Escuela Naval del Perú.

El doctor Víctor Latorre fue consultado sobre las posibles líneas de desarrollo del recién creado instituto. A sugerencia suya, tuve una entrevista con el señor Valdemar Llamosas, directivo del IPEN, quien me informó que el instituto tenía planes de impulsar el desarrollo de la energía nuclear en el país, lo que requería la formación de profesionales especializados en este campo.

En ese periodo, la UNI enviaba a jóvenes docentes a la Universidad de Grenoble para estudiar física del estado sólido, gracias a becas otorgadas por el gobierno francés. Ante las perspectivas nucleares que se presentaban en el Perú, planteé que, en caso de obtener una beca, mi doctorado se enfocara en física nuclear en el Instituto de Física Nuclear (IPN) de Orsay, una institución fundada por los premios Nobel Frédéric e Irène Joliot-Curie. Mi propuesta fue aceptada, y así, a mediados de 1975, partí a Francia para adentrarme en el campo que me había fascinado desde mis estudios en el INEI de Chimbote.

En 1976 se oficializó el Plan Nuclear del Perú. Este plan, en su primera fase, contemplaba la adquisición de un reactor nuclear de entrenamiento y la construcción de un Centro Nuclear de Investigaciones, equipado con un reactor de investigación de 10 MW.

5. Estudios de fisión nuclear pensando en el Perú

En junio de 1976, terminé los cursos de doctorado en el Instituto de Física Nuclear (IPN) de Orsay. Posteriormente, obtuve un contrato con la Dirección General de Investigación Científica y Técnica (DGRST) para realizar una tesis de doctorado en un campo que debía elegir entre física

nuclear y física de partículas. Ante las perspectivas de contar con un reactor de investigaciones en el Perú, opté por trabajar en una tesis sobre fisión nuclear, el fenómeno en el que se basa el funcionamiento de un reactor nuclear.

El 5 de marzo de 1977 se anunció el Acuerdo de Cooperación en los Usos Pacíficos de la Energía Nuclear entre los gobiernos de Perú y Argentina. El 5 de julio de ese año, se aprobó la Ley Orgánica del IPEN (Decreto Ley N° 21875), en la que se establecía como función principal del instituto promover, organizar, coordinar y controlar todas las investigaciones científicas, desarrollos tecnológicos, aplicaciones y procesos industriales relacionados con el uso de la energía nuclear para el beneficio del desarrollo y bienestar del país.

En septiembre de 1977, completé mi tesis sobre fisión nuclear. Poco después, firmé un contrato con la Comisión de Energía Atómica para llevar a cabo otra tesis para profundizar las investigaciones sobre fisión nuclear.

El 25 de octubre de 1977 se declaró de interés y necesidad nacional la ejecución del proyecto Centro Nuclear de Investigaciones del Perú. El 5 de noviembre del mismo año se firmó el contrato para la construcción del Centro Nuclear de Huarangal entre la Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina (CNEA) y el IPEN.

El 20 de julio de 1978, a las 04:30 horas, se puso en estado crítico el primer reactor nuclear peruano de potencia cero (RP-0). Este reactor fue construido por la CNEA con la participación de jóvenes científicos e ingenieros del IPEN.

En diciembre de 1978, como parte de mi trabajo de tesis dirigido por el físico nuclear Claude Signarbieux, participé en experimentos de fisión de núcleos de uranio-233, uranio-235 y plutonio-239 en el Reactor de Alto Flujo (HFR) del Instituto Laue-Langevin (ILL) en Grenoble, una instalación compartida por Francia, Alemania e Inglaterra. El HFR era en ese momento el reactor de investigación más potente del mundo. Estos experimentos fueron realizados por el equipo científico de fisión nuclear del Centro de Estudios Nucleares de Saclay, liderado por Claude Signarbieux.

En esos experimentos se midió la diferencia de los tiempos de vuelo de los fragmentos de fisión y sus energías cinéticas. La alta resolución en la medición de los tiempos de vuelo permitió separar las masas de los fragmentos, demostrando la existencia de fragmentos que no emitieron neutrones, lo que condujo al descubrimiento de la llamada fisión fría [3].

Paralelamente, participé en estudios sobre la distribución de energía cinética en función de la masa tras la emisión de neutrones por los fragmentos de fisión del uranio-235. Estas mediciones se realizaron en el espectrómetro de masas LOHENGRIN del ILL. Los resultados de este experimento fueron presentados en el IV Simposio Internacional sobre Fisión y Química de la Fisión, organizado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en el Centro Nuclear de Jülich, Alemania [4].

El 4 de febrero de 1980, se inició la construcción del Centro Nuclear de Huarangal. Ese mismo año, se aprobó el Decreto Ley N° 23112, mediante el cual se otorgaba al IPEN la responsabilidad del control y la explotación de minerales radiactivos.

6. Planes para el reactor nuclear del Perú

El Centro Nuclear de Huarangal, en construcción, contará con un reactor de investigación de 10 MW (RP-10). Un reactor nuclear de investigación como el planeado RP-10 es una fuente de neutrones, los cuales son emitidos por los fragmentos de la fisión, inducida por neutrones térmicos, del uranio-235 en el núcleo del reactor. Desde el núcleo del reactor, se construyen conductos que generan haces de neutrones, los cuales llegan a la sala experimental que rodea al reactor. Estos haces permiten irradiar materiales para estudiar su estructura. Las aplicaciones de la radiación neutrónica abarcan campos como la ciencia, la tecnología, la industria, la medicina y la educación. Entre las aplicaciones específicas de la radiación neutrónica de un reactor nuclear de investigación destacan:

- Producción de radioisótopos médicos como el tecnecio-99m (^{99m}Tc) para diagnóstico por imágenes en medicina nuclear.
- Investigación científica sobre la estructura y las propiedades de los núcleos atómicos, distribuciones de masa, energía cinética y efectos de interacción nuclear.
- Irradiación de materiales para mejorar sus propiedades, como resistencia a la radiación o endurecimiento.
- Pruebas de materiales nucleares, incluyendo el desempeño de combustibles y componentes estructurales para reactores de potencia.
- Análisis por activación neutrónica para determinar elementos traza en muestras ambientales, geológicas y biológicas.
- Difracción de neutrones para estudiar la estructura cristalina y las propiedades de materiales avanzados.
- Radiografía con neutrones para analizar componentes sin dañarlos.
- Producción de semiconductores mediante el dopado de silicio por irradiación neutrónica.
- Estudios de interacción neutrón-materia para comprender procesos nucleares.
- Datación de materiales utilizando la técnica de huellas de fisión.
- Monitoreo de contaminantes y estudios sobre el transporte de radionucleidos en la naturaleza.
- Pruebas de nuevos diseños de reactores y combustibles nucleares.
- Investigaciones relacionadas con reactores modulares pequeños (SMR) o reactores de próxima generación.
- Formación de ingenieros nucleares, físicos y técnicos especializados.
- Entrenamiento práctico para operar reactores nucleares y sistemas relacionados.

Con un reactor de 10 MW, es posible realizar investigaciones en estos y otros campos relacionados con la educación, la ciencia, la tecnología y la innovación, en colaboración con diversas instituciones dedicadas a la investigación.

El 9 de octubre de 1981, sustenté mi tesis sobre la fisión fría del uranio-233, uranio-235 y plutonio-239 en el auditorio del IPN de Orsay. El jurado estuvo presidido por Nadine Marty, directora del IPN, e incluyó como miembro a Marc Lefort, quien más tarde sería director del Gran Acelerador Nacional de Iones Pesados (GANIL).

En ese trabajo, se demostró que el efecto par-impar nulo en la distribución de masas de los fragmentos de fisión era compatible con efectos par-impar no nulos en la distribución del número de neutrones y protones, respectivamente. Este hallazgo fue reconocido ese mismo año por el equipo liderado por Hervé Nifenecker [5].

7. Regreso y exilio forzado

A fines de 1981 el presidente del IPEN, el general Juan Barreda Delgado, me propuso un contrato de trabajo. Solicité que dicho contrato comenzara en marzo de 1982. Ante su aceptación, volví a Francia para arreglar asuntos administrativos y trasladar mis pertenencias. Regresé al Perú en marzo de 1982 e ingresé al IPEN, donde poco más tarde fui designado director del Centro Superior de Estudios Nucleares (CSEN).

En el CSEN revisé los datos experimentales de mi tesis de doctorado, los cuales evidenciaban una ausencia sistemática de efectos par-impar en la distribución de masas de los fragmentos fríos de fisión inducida por neutrones térmicos en los núcleos de uranio-233 y uranio-235, respectivamente [6]. Como resultado, en 1984 el IPEN logró su primera publicación científica en una revista indexada en la base de datos bibliográfica Scopus [7]. La fisión fría se refiere a eventos de fisión nuclear en los que los fragmentos resultantes tienen una energía de excitación mínima, sin emisión de neutrones ni rayos gamma. Este fenómeno permite mediciones precisas de las distribuciones de masa y energía cinética de los fragmentos, proporcionando información sobre el proceso de fisión. En el artículo publicado se presentaron las líneas de equi-probabilidad en las regiones de alta energía cinética, destacando las características de la fisión fría en fragmentos con número másico identificado.

Ese mismo año, 1984, como investigador del IPEN, participé en un estudio sobre materiales intermetálicos para la absorción de hidrógeno, realizado en el Centro de Investigación Nuclear (KFK, por sus siglas en alemán) de Jülich. Este trabajo trató sobre hidruros metálicos que absorben y desorben hidrógeno, útiles para aplicaciones en almacenamiento de energía, baterías de hidrógeno y pilas de combustible. La técnica experimental empleada fue la dispersión inelástica de neutrones, utilizada para identificar la profundidad de los pozos de potencial que atrapaban a los electrones. El experimento se llevó a cabo en el reactor HFR del Instituto Laue-Langevin (ILL) en Grenoble [8].

Ese mismo año, Aurelio Arbildo, investigador del IPEN, con James Craig Robertson de la Universidad de Nuevo México utilizaron la técnica del baño de manganeso para resolver un problema técnico relacionado con la determinación precisa de las secciones transversales de neutrones térmicos [9].

En esa época, el presidente, el director ejecutivo y varios directores del IPEN eran miembros del Ejército. La relación entre los científicos civiles y los militares no estaba exenta de tensiones. Además, los investigadores científicos del IPEN recibían una remuneración equivalente a cien dólares estadounidenses, insuficiente para mantener a una familia. En respuesta, se organizó el Sindicato de Empleados del IPEN (SEIPEN) para exigir un aumento salarial. Paralelamente, se creó la Asociación de Profesionales Nucleares, que apoyó las demandas planteadas por el SEIPEN. La reacción de los militares fue despedir a trabajadores representativos de diversos grupos ocupacionales. Estuve entre los despedidos, junto con otros trabajadores. Ante esta situación, partí al extranjero para no interrumpir mis investigaciones en física nuclear.

Entre 1985 y 1986 trabajé como investigador en el Centro de Investigación de Iones Pesados (GSI, por sus siglas en alemán) de Darmstadt, Alemania. Durante ese tiempo proseguí estudiando aspectos de la fisión fría [10] y, paralelamente, participé en experimentos orientados a la producción de nuevos elementos [11] y a la fusión fría entre iones pesados [12] [13].

Entre 1986 y 1987 estuve como investigador invitado en el Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNRS, por sus siglas en francés) de Francia, en el IPN de Orsay. Allí continué mis investigaciones sobre fisión nuclear y paralelamente participé en experimentos de colisión de iones pesados bajo la dirección de Bernard Borderie [14], [15], [16].

En 1988 acepté una invitación de Morton Kaplan para investigar en el Instituto Carnegie Mellon (CMI: por sus siglas en inglés) que forma parte de la Universidad Carnegie Mellon en Pittsburgh. Participé en un experimento sobre colisión nuclear [17], realizado en el Laboratorio Nacional de Lawrence Berkeley (LBNL) Durante mi estadía en Berkeley, me enteré de que el doctor Víctor Latorre había sido designado presidente del IPEN. Sin pensarlo dos veces, interrumpí mi contrato con el CMI y regresé al Perú en mayo de 1988. Estaba convencido de que no habría otra oportunidad. Recuerdo que un directivo del CMI me dijo: “En América Latina no habrá solución en 50 años. Después, quién sabe”. Pero yo no me imaginaba viviendo en otro país que no fuera el Perú.

8. Retorno al IPEN

El Dr. Víctor Latorre había sido designado con la misión de inaugurar el reactor nuclear RP-10, cuya construcción estaba retrasada. Al mismo tiempo, se trataba de preparar los equipos para el uso del reactor. La misión no era fácil, dado que no había recursos para adquirir los instrumentos para utilizar los haces de neutrones. Lo que se había previsto para los primeros años era la producción de radioisótopos para la medicina y el análisis por activación neutrónica.

8.1 Fisión nuclear en el IPEN

Desde mi regreso al IPEN proseguí el estudio de fisión se seguía teniendo aspectos no comprendidos. El estudio de la fisión nuclear requiere analizar tanto las condiciones iniciales como las finales del proceso. Se asume que este comienza con un núcleo transuránico y culmina en la configuración de escisión, la que está compuesta por dos fragmentos nucleares excitados. En esta etapa, se genera una distribución de probabilidades de masa y carga, así como energía de excitación de los fragmentos en el momento de la escisión.

Sin embargo, los fragmentos que llegan a los detectores experimentales después de la emisión de neutrones, producto de la liberación de la energía de excitación que tenían en el momento de la escisión. Esto implica que la masa y la energía cinética finales de los fragmentos, están influenciadas por los efectos de la emisión de neutrones. Así, la masa y la energía, que tenían antes de la emisión de neutrones, calculadas en un experimento dependen de la técnica utilizada.

Por ejemplo, uno de los problemas recurrentes en el estudio de la fisión nuclear es el ensanchamiento anómalo observado en la distribución de la energía cinética en función de la masa final de los fragmentos. Este fenómeno, inicialmente interpretado como una característica intrínseca de la fisión, ha sido reevaluado mediante simulaciones basadas en el método Monte Carlo.

Las simulaciones han permitido demostrar que estas anomalías no están necesariamente presentes en las distribuciones primarias de los fragmentos, es decir, antes de la emisión de neutrones. Los resultados sugieren que las anomalías observadas experimentalmente se originan en las características de la emisión de neutrones y las variaciones en el promedio de energía cinética y el rendimiento de los fragmentos [18], [19].

Por otro lado, se ha demostrado que, en el caso de particiones isobáricas con valores de energía liberada en la fisión (Q) similares, las divisiones más asimétricas en términos de distribución de carga generan un mayor valor de energía cinética total (TKE). Este fenómeno, denominado efectos Coulomb en la fisión fría, puede explicarse por las interacciones de repulsión electrostática entre los fragmentos cargados y sus energías de deformación [20].

8.2 Huellas de fisión

En diciembre de 1988, tras lograr la inauguración del reactor RP-10, el doctor Víctor Latorre renunció al cargo de presidente del IPEN. Hasta ese momento, los planes principales del reactor incluían la producción de radioisótopos y el análisis por activación neutrónica. Con el objetivo de ampliar el abanico de aplicaciones del RP-10, a principios de la década de 1990 se creó la Subgerencia de Física Nuclear y Estado Sólido (FINES), a la cual me integré.

Ante el interés de investigaciones sobre datación de muestras geológicas del uranio, incluyendo la datación de vidrios volcánicos, en FINES, con financiamiento del CONCYTEC, establecimos un laboratorio de grabado químico para el estudio de huellas de fisión.

Un equipo interdisciplinario integrado por tres científicos franceses, dos italianos y cuatro peruanos fueron los primeros usuarios. El equipo, liderado por Gérard Poupeau, del CNRS de Francia, incluyó al químico Pablo Flores y al geólogo Guido Arroyo, ambos del IPEN; a la física Patrizia Pereyra, de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP); y al geólogo Guido Salas, de la Universidad Nacional San Agustín (UNAS) de Arequipa. Este equipo realizó un análisis geocronológico de vidrios de obsidiana, conocidos como "macusanita", provenientes de la región de Macusani. El estudio combinó las técnicas de huellas de fisión y potasio-argón (K-Ar) para determinar las edades de los vidrios volcánicos y comprender sus implicancias geodinámicas en el contexto tectónico del Altiplano andino. [21].

8.3 Neutrografía

Además, con financiamiento del CONCYTEC, en 1992 FINES estableció un laboratorio de radiografía con neutrones (neutrografía). Para ello, se construyó un búnker de blindaje al final de uno de los tubos radiales de neutrones del reactor RP-10. Este esfuerzo contó con la participación de Herminio Hinostroza, Yuri Ravello, Nilo Cornejo, Mario Mendoza, Agustín Zúñiga e Israel Huapaya [22].

8.4 Física médica

A principios de los años 90, el mundo experimentaba una rápida evolución en la aplicación de las radiaciones en medicina, mientras que en el Perú se enfrentaba una escasez de profesionales capacitados en este campo. Reconociendo esta necesidad, en 1994, siendo profesor a tiempo parcial de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) e investigador del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), presenté un proyecto titulado "Medical Physics Training" ante el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Este proyecto fue aprobado con el código PER0020.

El objetivo principal del proyecto era introducir una maestría en física médica que contribuyera a mejorar el diagnóstico médico y la terapia en los hospitales peruanos mediante la formación de

profesionales altamente capacitados en el uso seguro y efectivo de radiaciones ionizantes en medicina.

El proyecto PER0020 fue aprobado en 1995 y se completó con éxito el 27 de enero de 1999, marcando un hito en la introducción formal de la física médica en el Perú.

Dentro del marco de la maestría, el primer trabajo de investigación se centró en la simulación de la irradiación de una mano humana con rayos X. El objetivo de este estudio fue calcular la energía óptima de los rayos X que proporcionara una imagen de alta calidad con la menor dosis posible al paciente [23]. Este trabajo pionero fue presentado en la Conferencia Internacional Anual del IEEE sobre Ingeniería en Medicina y Biología en el año 2000, destacando la relevancia de la física médica para mejorar la seguridad y la eficacia de los procedimientos radiológicos.

El proyecto PER0020 sentó las bases para el desarrollo de la física médica en el Perú, contribuyendo a la formación de un cuerpo profesional especializado y al establecimiento de una maestría en la UNI que ha permitido enfrentar los desafíos asociados al uso de radiaciones en medicina. Esta iniciativa no solo respondió a las necesidades locales, sino que también conectó al Perú con los avances globales en esta disciplina, consolidando su papel en la mejora de la salud pública y la seguridad radiológica.

10: Física nuclear y aplicaciones en la UNI

Hasta el año 2015, mis actividades de investigación se desarrollaban a tiempo completo en el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), complementadas con la docencia a tiempo parcial en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Sin embargo, el declive en el interés por la investigación científica por parte de las autoridades del IPEN y la falta de incorporación de jóvenes investigadores llevaron a una reducción significativa de las oportunidades para desarrollar proyectos científicos de largo alcance en esa institución.

Ante este panorama, en 2015 tomé la decisión de dedicarme a tiempo completo a la UNI, donde siempre he encontrado promociones de estudiantes motivados y dispuestos a realizar sus tesis en temas de investigación científica. Esta transición no solo permitió la continuidad de mis proyectos de investigación, sino que también me brindó la oportunidad de contribuir de manera más directa al desarrollo académico y científico de las nuevas generaciones.

Paradójicamente, a pesar de que la UNI cuenta con una maestría en energía nuclear y una maestría en física médica, no se tenía docentes que realizaran investigaciones relacionadas sobre estos temas. Ante ello se empezó a formar el Grupo de Física Nuclear y Aplicaciones, convocando a tesis sobre los temas de fisión nuclear, física médica y uso de las radiaciones en temas ambientales.

10.1 Fisión nuclear en la UNI

En la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), se realizaron investigaciones sobre la fisión nuclear con el apoyo de estudiantes, logrando avances significativos en la comprensión de los procesos involucrados. En el caso de la fisión inducida por neutrones térmicos del uranio-235, demostramos que las configuraciones de fragmentos con un número par de protones alcanzan un mayor valor máximo de energía cinética total (TKE) [24]. Sin embargo, utilizando un algoritmo de simulación Monte Carlo, mostramos que la emisión de neutrones afecta las propiedades

observadas en los fragmentos finales, lo que hace que esta preferencia sea menos evidente en regiones fuera de la fisión fría. Este comportamiento se confirmó tanto para el uranio-233 [25], como para el uranio-235 [26].

Como lo hemos señalado antes, el análisis técnico de la fisión nuclear enfrenta un problema fundamental: la imposibilidad de medir directamente las masas de los fragmentos en el punto de escisión. Esto obliga a estimarlas a partir de mediciones indirectas, que están afectadas por la emisión de neutrones. Por ejemplo, mediante un modelo de simulación de la técnica 2E (dos energías), que calcula las masas de los fragmentos a partir de las energías cinéticas finales, se observa una sobreestimación del promedio de la multiplicidad neutrónica como función de las masas calculadas, en comparación con las masas primarias reales. Este efecto es particularmente notable en la región de fragmentos livianos cercanos a la simetría.

La sobreestimación mencionada se ha demostrado en varios sistemas nucleares, incluyendo: en fisión inducida por neutrones térmicos de uranio-233 y uranio-235 [27], plutonio-239 [28] y en la fisión espontánea del californio-252 [29].

Este trabajo demostró la importancia de considerar los efectos de la emisión de neutrones al interpretar los datos experimentales de fisión nuclear. Las simulaciones Monte Carlo y el desarrollo de modelos más precisos, como la técnica 2E, son herramientas clave para avanzar en la comprensión de los procesos subyacentes y mejorar la precisión de los cálculos relacionados con las propiedades de los fragmentos. Estas investigaciones no solo contribuyen al conocimiento fundamental de la fisión nuclear, sino que también tienen implicaciones en áreas como el diseño de reactores nucleares y la seguridad radiológica.

10.2 Física de las radiaciones para la física médica

Entre el 23 y el 27 de octubre de 2017, participé en el Simposio Latinoamericano sobre Física Nuclear y Aplicaciones (LASNPA). Durante este evento, establecí contacto con el físico médico Dante Roa, de la Universidad de California, Irvine, quien propuso la organización de un equipo multidisciplinario para diseñar y construir un detector tridimensional para dosimetría en radioterapia.

Dante Roa trabajaba en colaboración con investigadores de Perú, Estados Unidos y Brasil, consolidando un grupo que incluyó a Oliver Páucar, de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la UNI, y egresados de la Maestría en Física Médica de la misma universidad: Andrés Gonzales, Alberto Gonzales, Roger Challco y Zintia Arque.

Con la llegada de la pandemia de COVID-19, el grupo adaptó su enfoque para investigar un posible tratamiento mediante radiación X, explorando su viabilidad y efectividad como una herramienta terapéutica alternativa en ese contexto [30], [31], [32], [33].

Tras la pandemia, se retomaron las investigaciones sobre el diseño del detector tridimensional para dosimetría, logrando avances significativos. Los primeros resultados de este trabajo fueron presentados en la Conferencia de la AIP (American Institute of Physics) en el año 2020 [34]. Estos logros reflejan el compromiso del equipo con la innovación tecnológica en el campo de la física médica, así como la efectividad de la colaboración internacional para abordar desafíos complejos en este ámbito.

10.3 Radiaciones en el ambiente

Pensando en el abastecimiento de agua a los 13 millones de habitantes de Lima, hemos estudiando la dinámica del acuífero del río Rímac. Para ello se ha usado la técnica de hidrología.

Mediante análisis de isótopos de hidrógeno (^2H) y oxígeno (^{18}O), se determinó que las aguas subterráneas del acuífero de Lima provienen de precipitaciones ocurridas en las zonas altas de las cuencas de los ríos Rímac y Santa Eulalia, entre 3,000 y 5,000 metros sobre el nivel del mar. Se estimó que el tiempo promedio que tarda el agua desde su infiltración en las zonas altas hasta llegar a los pozos en la costa es de aproximadamente seis años. Esta estimación se basa en la correlación entre el flujo histórico del río Rímac y el nivel estático de un pozo en Miraflores, ubicado a un kilómetro del océano Pacífico. [35].

Los estudios sugieren que los pozos y manantiales se recargan principalmente con las aguas de los ríos Rímac y Santa Eulalia en áreas que comienzan a una altitud de 500 metros sobre el nivel del mar, donde se inicia la formación del acuífero de Lima. Para evitar la escasez de agua, se recomienda intensificar los proyectos de recarga del acuífero mediante pozos ubicados cerca del río Rímac.

Estos hallazgos son fundamentales para la gestión sostenible de los recursos hídricos de Lima, ya que proporcionan información clave sobre la fuente y el movimiento del agua subterránea en la región. isotópica y la dinámica de los niveles de los pozos que tiene Lima.

Diego García Tadeo del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) tomó contacto conmigo asesorarlo en su trabajo de medición de radón para estudiar la susceptibilidad de los entornos proglaciares tropicales en Perú, enfocándose en el lago proglaciar Palcacocha. El estudio encontró que las avalanchas de hielo que impactan significativamente en el lago proglaciar generan flujos turbulentos que aumentan las concentraciones de radón en la atmósfera circundante. En ausencia de estas avalanchas, los niveles de radón disminuyen [36]. Como se sabe el gas radiactivo radón se encuentra en rocas del subsuelo y se libera ante fracturaciones producido por sismos o exposición de esas rocas a la atmósfera por diversos motivos, como por ejemplo las avalanchas.

11. El Rol de la UNI en el Desarrollo Nuclear del Perú

El calentamiento global está generando catástrofes a nivel mundial, con innumerables pérdidas humanas y consecuencias devastadoras. Frente a esta realidad, la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles se ha intensificado. En países como Alemania, la crisis energética ha sido exacerbada por el abandono de la energía nuclear. En Francia, una disminución en el desarrollo de esta tecnología ha provocado desafíos similares. Este contexto está llevando a un renovado interés en los reactores nucleares, especialmente en los pequeños reactores modulares (SMR), debido a su potencial para ser una fuente energética segura, eficiente y escalable.

El avance en este campo requerirá un enfoque riguroso en la investigación de las variables relacionadas con la fisión nuclear, fundamentales para el diseño y operación de reactores seguros. En este panorama, la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) tiene la oportunidad de fortalecer su Maestría en Energía Nuclear, promoviendo la colaboración interdisciplinaria con otras facultades y estableciendo lazos con instituciones nacionales e internacionales.

Paralelamente, el incremento global en los casos de cáncer y el desarrollo acelerado de tecnologías como aceleradores de partículas, junto con nuevos instrumentos para el radiodiagnóstico y la radioterapia, resaltan la importancia de la física médica como disciplina clave. Este crecimiento demanda profesionales altamente capacitados, y la UNI está posicionada para asumir este desafío mediante el fortalecimiento de su Maestría en Física Médica. Este esfuerzo podría incluir la actualización de su currículo y la promoción de proyectos de investigación aplicada en colaboración con centros hospitalarios y empresas tecnológicas.

Además, las aplicaciones nucleares en estudios ambientales son necesarias para estudios ambientales, pero también para diversos otros sectores productivos.

Los trabajos ya realizados por la universidad, documentados en este informe, demuestran que cuenta con la capacidad técnica y académica para asumir estos desafíos. Con un enfoque en la innovación, la formación de profesionales especializados y la integración con redes globales, la UNI puede liderar el camino hacia un futuro en el que la energía nuclear y la física médica contribuyan significativamente al desarrollo sostenible del país.

12. Conclusión

La UNI tiene en sus manos la posibilidad de marcar un hito en el desarrollo nuclear del Perú, tanto en el ámbito energético como en el médico y el ambiente. Este desafío exige no solo fortalecer sus programas de posgrado, sino también articular esfuerzos interdisciplinarios y aprovechar su capacidad de liderazgo académico para posicionarse como un referente en la región. La crisis climática y las necesidades de salud pública y la protección ambiental hacen urgente y estratégico este compromiso.

Referencias

- [1] J. C. , B. M. J. , H. W. R. , L. V. A. Armstrong, “1.7-MeV anomaly in the $C^{12}(p, \alpha)pC^{12}$ reaction,” *Physical Review*, vol. 144, no. 3, pp. 823–828, 1966.
- [2] “Levels from Elastic Scattering of Protons by ^{20}Ne ”, doi: 10.1103/PhysRev.144.823.
- [3] C. Signarbieux *et al.*, “Evidence for nucleon pair breaking even in the coldest scission configurations of ^{234}U and ^{236}U ,” *Journal de Physique Lettres*, vol. 42, no. 19, pp. 437–440, Oct. 1981, doi: 10.1051/jphyslet:019810042019043700.
- [4] R. Brissot *et al.*, *Kinetic-energy distribution for symmetric fission of ^{236}U* . International Atomic Energy Agency, 1980. Accessed: May 15, 2019. [Online]. Available: <https://inis.iaea.org/search/searchsinglerecord.aspx?recordsFor=SingleRecord&RN=12609445>
- [5] H. Nifenecker, G. Mariolopoulos, and J. P. Bocquet, “Pair breaking mechanism in cold fission,” *Journal de Physique Lettres*, vol. 42, no. 24, pp. 527–529, Dec. 1981, doi: 10.1051/jphyslet:019810042024052700.
- [6] M. Montoya, “Nucleon pair breaking in the thermal neutron induced fission of ^{233}U and ^{235}U ,” *Journal de Physique*, vol. 44, no. 7, pp. 785–790, Jul. 1983, doi: 10.1051/jphys:01983004407078500.
- [7] M. Montoya, “Mass and kinetic energy distribution in cold fission of ^{233}U , ^{235}U and ^{239}Pu induced by thermal neutrons,” *Zeitschrift für Physik A Atoms and Nuclei*, vol. 319, no. 2, pp. 219–225, Jun. 1984, doi: 10.1007/BF01415636.

- [8] R. Hempelmann, D. Richter, G. Eckold, J. J. Rush, J. M. Rowe, and M. Montoya, "Localized hydrogen modes in LaNi₅Hx," *Journal of the Less Common Metals*, vol. 104, no. 1, pp. 1–12, Dec. 1984, doi: 10.1016/0022-5088(84)90430-2.
- [9] A. Arbildo; J.C. Robertson, "THERMAL NEUTRON CROSS-SECTION RATIOS OF IMPORTANCE IN MANGANESE BATH MEASUREMENTS.," in *Annual Meeting - American Nuclear Society*, Transactions of the American Nuclear Society, 1984, pp. 757–758.
- [10] M. Montoya, R. W. Hasse, P. Koczon, R. W. Hasse, M. Montoya, and P. Koczon, "Coulomb effects in cold fission," *INSTITUTO PERUANO DE ENERGÍA NUCLEAR-IPEN*, 1986, Accessed: May 17, 2019. [Online]. Available: <http://dspace.ipen.gob.pe/handle/ipen/99>
- [11] S. Hofmann *et al.*, "The influence of the surprising decay properties of element 108 on search experiments for new elements," *Nucl Phys A*, vol. 447, pp. 335–346, Jan. 1986, doi: 10.1016/0375-9474(86)90615-9.
- [12] U. Gollerthan *et al.*, "Observation of enhanced low-energy charged-particle emission in the cold fusion reaction $90\text{Zr}+89\text{Y}$," *Physics Letters B*, vol. 201, no. 2, pp. 206–210, Feb. 1988, doi: 10.1016/0370-2693(88)90213-4.
- [13] U. Gollerthan *et al.*, "Decay of the compound nucleus 179Au formed in the cold fusion reaction $90\text{Zr}+89\text{Y}$," *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*, vol. 338, no. 1, pp. 51–60, Mar. 1991, doi: 10.1007/BF01279114.
- [14] B. Borderie *et al.*, "Deeply inelastic collisions as a source of intermediate mass fragments at $E/A=27$ MeV," *Physics Letters B*, vol. 205, no. 1, pp. 26–29, Apr. 1988, doi: 10.1016/0370-2693(88)90393-0.
- [15] D. Jouan *et al.*, "Dynamics and thermalization in violent collisions between 40Ar and Ag at 27 MeV/nucleon," *Zeitschrift für Physik A: Hadrons and Nuclei*, vol. 340, no. 1, pp. 63–77, Mar. 1991, doi: 10.1007/BF01284482.
- [16] B. Borderie *et al.*, "Excitation energy partition in deeply inelastic collisions between 40Ar and Ag at 27 MeV per nucleon," *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*, vol. 338, no. 3, pp. 369–370, Sep. 1991, doi: 10.1007/BF01288204.
- [17] E. Vardaci *et al.*, "Search for ternary fragmentation in the reaction $856\text{ MeV } 98\text{Mo}+51\text{V}$: kinematic probing of intermediate-mass-fragment emissions," *Physics Letters B*, vol. 480, no. 3–4, pp. 239–244, May 2000, doi: 10.1016/S0370-2693(00)00407-X.
- [18] M. Montoya, E. Saettone, and J. Rojas, "Monte Carlo simulation for fragment mass and kinetic energy distributions from the neutron-induced fission of ^{235}U ," *Revista mexicana de física*, vol. 53, no. 5, pp. 366–370, 2007, Accessed: Aug. 12, 2019. [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0035-001X20070005000006&lng=es&nrm=iso
- [19] M. Montoya, J. Rojas, and I. Lobato, "Neutron emission effects on final fragments mass and kinetic energy distribution from low energy fission of ^{234}U ," *Revista mexicana de física*, vol. 54, no. 6, pp. 440–445, 2008, Accessed: Jun. 10, 2019. [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0035-001X20080006000006&script=sci_arttext

- [20] M. Montoya, "Coulomb effects in isobaric cold fission from reactions $^{233}\text{U}(\text{nth},\text{f})$, $^{235}\text{U}(\text{nth},\text{f})$, $^{239}\text{Pu}(\text{nth},\text{f})$ and $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$," *Revista Mexicana de Física*, vol. 60, no. 5, pp. 350–356, 2014.
- [21] G. Poupeau *et al.*, "Fission-track and K-Ar ages of 'macusanite' obsidian glasses, (SE Peru): Geodynamic implications," *Tectonophysics*, vol. 205, no. 1–3, pp. 295–305, Apr. 1992, doi: 10.1016/0040-1951(92)90432-6.
- [22] H. Hinostroza *et al.*, "Neutrografía en el reactor peruano RP-10," *INSTITUTO PERUANO DE ENERGÍA NUCLEAR-IPEN*, 1992, Accessed: May 16, 2019. [Online]. Available: <http://dspace.ipen.gob.pe/handle/ipen/154>
- [23] F. Amaya and M. Montoya, "Simulation of X ray irradiation on human hand," in *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology - Proceedings*, 2000.
- [24] M. Montoya and V. Collin, "Positive even-odd effects in the maximal kinetic energy and negative even-odd effects in the minimal excitation energy of fragments from thermal neutron induced fission of ^{235}U ," *Revista Mexicana de Física*, vol. 63, no. 2, 2017.
- [25] M. Montoya and A. Rivera, "Influence of neutron emission on the charge distribution of final fragments from thermal-neutron-induced fission of ^{233}U ," *Results Phys*, vol. 11, pp. 449–451, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.RINP.2018.09.039.
- [26] M. Montoya and A. Rivera, "Influence of neutron emission on the charge, mass and kinetic energy distribution of final fragments from $^{235}\text{U}(\text{n th}, \text{f})$ reaction," *J Phys Commun*, vol. 2, no. 8, p. 085016, Aug. 2018, doi: 10.1088/2399-6528/aac07b.
- [27] M. Montoya, "Behavior of the average prompt neutron multiplicity as a function of post-neutron fragment mass in correlation with the pre-neutron fragment mass distribution in thermal neutron induced fission of ^{235}U and ^{233}U ," *Results Phys*, vol. 14, no. May, p. 102356, 2019, doi: 10.1016/j.rinp.2019.102356.
- [28] M. Montoya, O. Páucar, A. Obregón, and A. Aponte, "Monte Carlo simulation of the measurement by the 2E technique of the average prompt neutron multiplicity as a function of the mass of fragments from thermal neutron-induced fission of ^{239}Pu ," *Revista Mexicana de Física*, vol. 68, no. 1 Jan-Feb, Dec. 2021, doi: 10.31349/RevMexFis.68.011201.
- [29] M. Montoya, A. Obregón, and M. Alvarez, "Simulation of the 2E Technique on neutron multiplicity measurement as a function of fragment mass in spontaneous fission of ^{252}Cf ," *Revista Mexicana de Física*, vol. 70, no. 3 May-Jun, May 2024, doi: 10.31349/RevMexFis.70.031201.
- [30] D. Roa *et al.*, "Rationale for using a C-arm fluoroscope to deliver a kilovoltage radiotherapy treatment to COVID-19 patients," 2020. doi: 10.1016/j.meddos.2020.07.008.
- [31] D. Roa *et al.*, "Dose simulations of an early 20th century kilovoltage pneumonia radiotherapy technique performed with a modern fluoroscope," *Medical Dosimetry*, 2020, doi: 10.1016/j.meddos.2020.08.002.
- [32] D. Roa *et al.*, "Monte Carlo simulations and phantom validation of low-dose radiotherapy to the lungs using an interventional radiology C-arm fluoroscope," *Physica Medica*, vol. 94, pp. 24–34, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.ejmp.2021.12.014.

- [33] S. Leon *et al.*, “Low-dose radiotherapy to the lungs using an interventional radiology C-arm fluoroscope: Monte Carlo treatment planning and dose measurements in a postmortem subject,” *Biomed Phys Eng Express*, vol. 8, no. 6, p. 065004, Nov. 2022, doi: 10.1088/2057-1976/ac8939.
- [34] R. Challco *et al.*, “A three-dimensional electronic detector array for radiotherapy based on active matrices,” 2021, p. 040003. doi: 10.1063/5.0051241.
- [35] Modesto Montoya, Julio Kuroiwa, Rubén Rojas, Flúquer Peña, and Maura Charca, “On the origin and residence time of water in the Lima aquifer,” *Nucleus*, vol. 64, Dec. 2018, Accessed: Jan. 21, 2025. [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0864-084X2018000200059&script=sci_arttext&tlng=pt
- [36] D. A. García-Tadeo, M. Montoya-Zavaleta, and Y. Tan, “Understanding the Susceptibility of the Tropical Proglacial Environment in Peru Using Optical Imagery and Radon Measurements,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 14, no. 3, 2023, doi: 10.3390/atmos14030568.