

## Producción científica del Instituto Peruano de Energía Nuclear en 50 años de existencia

### Scientific production of the Peruvian Institute of Nuclear Energy in 50 years of existence

Modesto Edilberto Montoya Zavaleta<sup>1</sup>

#### RESUMEN

Cincuenta años después de su fundación, se analiza la producción científica del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), cuya infraestructura incluye como pieza central el reactor de investigación RP-10, un reactor de 10 MW que actúa como fuente de rayos neutrónicos. Para esta evaluación, se utiliza la base de datos bibliográfica Scopus, reconocida por el CONCYTEC para medir la producción científica en el Perú. Desde sus inicios, el IPEN ha desarrollado investigaciones en fisión nuclear, geología del uranio, neutrónica y aplicaciones del análisis químico mediante activación neutrónica y huellas de fisión. Sin embargo, en la actualidad, la única línea de investigación activa es la relacionada con aplicaciones del análisis por activación neutrónica, con una producción anual promedio de apenas dos artículos publicados en revistas indexadas en Scopus. Un aspecto crítico es la inactividad en los tubos neutrónicos del RP-10 debido a la falta de instrumentación adecuada y de personal investigador capacitado para usarlas. En la práctica, el reactor RP-10 se utiliza principalmente para la producción de radiofármacos, compitiendo con empresas importadoras, lo que contrasta con su naturaleza como instalación destinada a la investigación. Ante ello, resulta imperativo que el reactor cumpla con su propósito principal: promover la investigación básica y aplicada, siguiendo el ejemplo de otros países que poseen reactores similares y los utilizan como plataformas para su desarrollo científico y tecnológico.

**Palabras clave:** Instituto Peruano de Energía Nuclear, reactor RP-10, fisión nuclear, huellas de fisión, análisis por activación neutrónica.

Recibido: 03/02/2025  
Aceptado: 03/03/2025  
Publicado: 31/03/2025

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

Correspondencia:  
mmontoya@uni.edu.pe  
<https://orcid.org/0000-0002-3376-1872>

Licencia:



Revista de la Facultad de Ingeniería Económica, Ingeniería Estadística y Ciencias Sociales de la Universidad Nacional de Ingeniería

## ABSTRACT

Fifty years after its foundation, the scientific output of the Peruvian Institute of Nuclear Energy (IPEN) is analyzed. Its infrastructure includes, as a central component, the RP-10 research reactor, a 10 MW reactor that serves as a neutron source. For this evaluation, the Scopus bibliographic database is used, as it is recognized by CONCYTEC for measuring scientific production in Peru. Since its inception, IPEN has conducted research in nuclear fission, uranium geology, neutron physics, and applications of chemical analysis through neutron activation and fission track techniques. However, at present, the only active research line is related to applications of neutron activation analysis, with an average annual output of only two articles published in Scopus-indexed journals. A critical issue is the inactivity of the RP-10 neutron tubes due to the lack of adequate instrumentation and trained research personnel to operate them. In practice, the RP-10 reactor is primarily used for radiopharmaceutical production, competing with importing companies—an approach that contrasts with its intended purpose as a research facility. Given this situation, it is imperative that the reactor fulfills its primary purpose: to promote basic and applied research, following the example of other countries that possess similar reactors and use them as platforms for scientific and technological development.

**Keywords:** *Peruvian Institute of Nuclear Energy, RP-10 reactor, nuclear fission, fission tracks, neutron activation analysis.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El 4 de febrero de 1975 se creó el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) (Gobierno del Perú, 2022). En su ley orgánica se le encarga como función principal la de 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 (Gobierno Peruano, 1977).

El 5 de noviembre de 1977, los gobiernos de Perú y Argentina firmaron un contrato para la construcción del Centro de Investigaciones Nucleares del Perú (CNIP), cuyo componente principal sería un reactor de investigación de 10 MW. El contrato incluía, además de la construcción del CNIP, la transferencia de tecnología, la participación del IPEN en todas las etapas del proyecto, un amplio plan de capacitación en todos los niveles, la intervención de la industria peruana y la asociación de empresas argentinas con empresas peruanas. El costo de la construcción del CNIP alcanzaría los 106 millones de dólares, según el valor de 1983 (Hurtado de Mendoza, 2009; Radicella, 2008)

Hoy, 50 años después de la creación del IPEN, resulta pertinente evaluar el costo de funcionamiento del IPEN, su producción científica y su potencial para contribuir al desarrollo del Perú.

Para dimensionar el costo anual de las actividades del IPEN, cabe mencionar que en 2023 su presupuesto fue de aproximadamente 40 millones de soles, de los cuales la mitad se destinó a gastos de personal y obligaciones sociales (IPEN, 2024). Para tener una idea del crecimiento presupuestal, cabe mencionar que el presupuesto del IPEN en el 2005 era alrededor de 28 millones de soles (Instituto Peruano de Energía Nuclear, 2006).

En cuanto a la producción científica, se ha tomado en cuenta los artículos publicados en revistas indexadas en la base de datos Scopus, reconocida por el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (CONCYTEC) y el Registro Nacional Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (RENACYT). Se considera únicamente los trabajos realizados en el IPEN, excluyendo aquellos desarrollados fuera del Perú por científicos de esta institución.

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. CIENCIA Y TECNOLOGÍA PRODUCIDA POR EL IPEN**

### **2.1 Estudios sobre la fisión nuclear y aplicaciones de las huellas de fisión**

El componente principal de CNIP es el reactor RP-10, basado en la fisión nuclear del  $^{235}\text{U}$ . El primer artículo publicado en una revista de la base de datos bibliográfica Scopus, fue sobre la fisión fría del  $^{235}\text{U}$ . En el artículo publicado se presentaron las líneas de equi-probabilidad en las regiones de alta energía cinética de los fragmentos de fisión, destacando las características de la fisión fría en fragmentos con número másico fue identificado (M. Montoya, 1984).

En 2007 se reinició el estudio de fisión, sobre temas que 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. 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 (M. Montoya et al., 2007), (M. Montoya et al., 2008).

Por otro lado, se demostró 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 (M. Montoya, 2014).

## 2.2 Huellas de fisión

Un equipo interdisciplinario integrado por tres científicos franceses, dos italianos y cuatro peruanos fueron los primeros usuarios de la técnica de huellas de fisión. 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, 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. (Poupeau et al., 1992).

## 2.3 Neutrografía

En 1992, de los tubos neutrónicos que salen desde la periferia del núcleo del reactor, uno se destinó para hacer radiografías con neutrones (neutrografía).

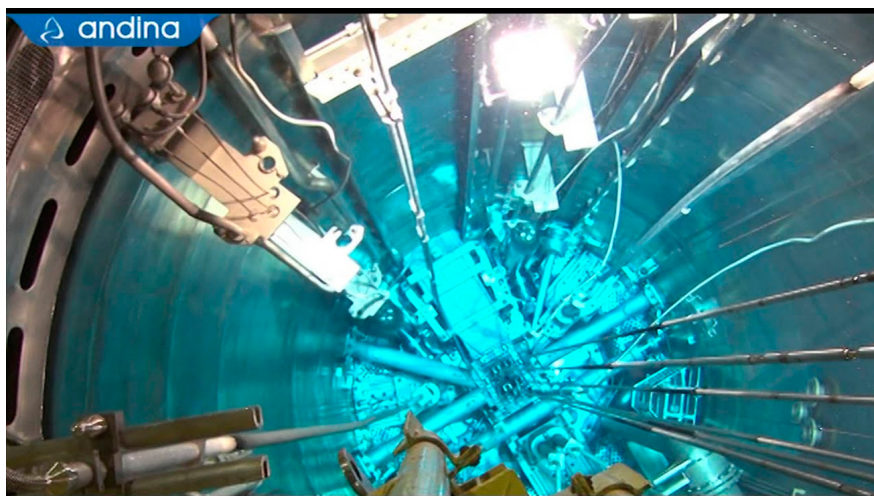


Figura 1: Del núcleo del reactor (matriz cuadrada) del reactor RP-10 del que salen 4 tubos radiales, un tubo tangencial y una columna térmica. El tubo delgado fue diseñado para una facilidad de neutrografía. No hay publicaciones recientes sobre el uso de esos tubos.

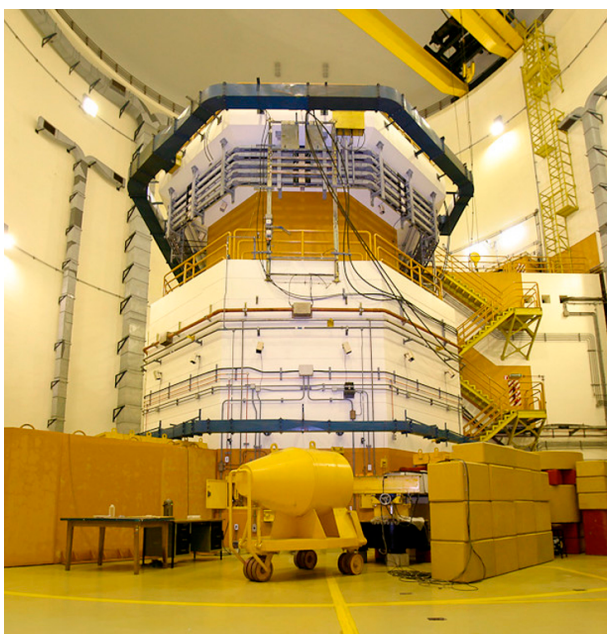


Figura 2: La facilidad de neutrografía, puesta en funcionamiento en los años 90, por el grupo de Física Nuclear y Estado Sólido. Actualmente no está en uso. No hay publicaciones recientes sobre su uso. Foto IPEN.

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 (Hinostroza et al., 1992). El año 2001, Yuri Ravello presenta este trabajo para optar el grado de licenciado en física en la UNI (Ravello, 2001).

## 2.4 Difracción de neutrones

El año 2006 se dieron los primeros pasos para el uso del haz de neutrones de un segundo tubo radial del RP-10. Se empezó a construir un sistema de difracción de dos ejes para la determinación de muestras de polvo, al que se le denominó “Difractómetro Amauta”. Se instaló el sistema mecánico que permite el movimiento de dos ejes y se montó una primera versión de blindaje de protección de campos mixtos. Se instaló un monocromador conformado por un monocristal de silicio focalizado. Se obtuvo los primeros registros de neutrones difractados en el primer eje, a diferentes potencias térmicas del reactor (Munive et al., 2007). El año 2010, se obtuvo picos de difracción de neutrones en polvo de níquel y óxido de itrio. Los patrones obtenidos mostraron una buena relación señal/ruido (Munive et al., 2010). El desarrollo de esta línea de investigación fue interrumpida.

## 2.5 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, se presentó un proyecto titulado “Medical Physics Training” ante el 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 calificados.

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 para calcular la energía óptima de los rayos X que proporcionara una imagen de alta calidad con la menor dosis posible al paciente (Amaya & Montoya, 2000). Este trabajo pionero en el Perú fue

presentado en la Conferencia Internacional Anual del IEEE sobre Ingeniería en Medicina y Biología en el año 2000.

El proyecto PER0020 contribuyó con 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.

## **2.6 Fiebre de uranio en Puno**

En 1985, Jacinto Valencia, del IPEN, estudió ignimbritas de edad Mio-Pliocena ubicadas en depresiones tectónicas tipo graben en el sur este del Perú. Esas ignimbritas presentan características geológicas particulares que las hacen prometedoras para la exploración y explotación de uranio. Este trabajo fue presentado en una reunión de un comité técnico convocado por el OIEA (J. Valencia & G. Arroyo, 1985).

La prospección de uranio en el Perú se realizó con el apoyo del OIEA, que envió expertos para investigar la geología de interés uranífero. Estos especialistas estudiaron la geología de Macusani para evaluar el potencial uranífero de esa región del sureste peruano. En 1986, el geólogo francés Michel Pichavant, el canadiense Daniel J. Kontak y el británico Alan H. Clark, junto con el geólogo peruano Jacinto Valencia del IPEN, analizaron los aspectos mineralógicos y la evolución magmática de las ignimbritas pertenecientes a las volcánicas de Macusani, una serie de depósitos del Mioceno-Plioceno ubicados en esa región (Pichavant et al., 1988a).

Posteriormente, el geólogo francés Louis Briquet se unió al equipo para profundizar en los aspectos geoquímicos y el origen del magma félsico y peraluminoso asociado con las volcánicas de Macusani. Este magma estaba relacionado con ignimbritas ricas en sílice y minerales aluminosilicatos, relevantes para los depósitos de uranio (Pichavant et al., 1988b).

A principios de la década de 1990, el IPEN mantenía su interés en el uranio. Los geólogos franceses Alain Cheilletz, experto en tectónica y geocronología, y Edward Farrar, especialista en datación isotópica, se unieron al equipo que estudiaba el vulcanismo en Macusani, junto con Guido Arroyo del IPEN. Este grupo combinó la estratigrafía volcánica y la datación geocronológica para entender la evolución geodinámica del Altiplano Andino en el sureste del Perú durante el Mioceno (Cheilletz et al., 1992). En 1993, realizaron la datación mediante huellas de fisión de 15 fragmentos de vi-

drio volcánico con el objetivo de determinar la cronología de formación y aportar información sobre los procesos geodinámicos de la región (Poupeau et al., 1993).

En 1996, el grupo revisó aspectos relacionados con la formación Cayconi en la Cuenca Crucero, en el departamento de Puno. A partir de investigaciones de campo y análisis petrológicos, los autores cuestionaron las relaciones estratigráficas previamente establecidas para esta formación. Además, propusieron un nuevo marco de clasificación litostratigráfica más adecuado para las rocas del Terciario en esa región (Sandeman et al., 1996).

En 1997, el equipo analizó la composición y las características geológicas de las suites ígneas terciarias que fueron agrupadas en el Supergrupo Crucero y la Supersuite Intrusiva Crucero, que presentan ensamblajes ígneos temporal y petrológicamente diferenciados (Sandeman et al., 1997).

Entre 1985 y 1995 se produjo una ola de cierres de minas, incluidas varias en Estados Unidos. La Guerra Fría había provocado una alta producción de uranio. Además, en concordancia con la Constitución promulgada en 1993, el Estado peruano dejó de ocuparse de temas relacionados con la producción, incluida la explotación de uranio. Todo ello llevó a una disminución del interés en las investigaciones sobre uranio en el IPEN.

## 2.7 Análisis por activación neutrónica (AAN).

La técnica del análisis por activación neutrónica (AAN) ha sido aplicada desde que el reactor RP-10 comenzó a operar. Se formó el Grupo de Análisis por Activación Neutrónica (GAAN). Sin embargo, las publicaciones en revistas indexadas en Scopus relacionadas con los trabajos realizados comenzaron en 1999, con la participación de Eduardo Montoya, Pablo Mendoza, Blanca Torres y Patricia Bedregal, asesorados por el científico argentino Isaac Cohen. El GAAN evaluó los errores al omitir el parámetro  $\alpha$ , que representa el comportamiento no ideal del flujo de neutrones epitermales, en la determinación de veinte elementos en materiales biológicos. Usando comparadores de oro, sodio y circonio para medir la relación entre los flujos térmicos y epitermales, se encontró que el sodio permite determinar 15 elementos, mientras que el uso simultáneo de comparadores de oro y sodio permite analizar hasta 18 elementos en posiciones bien termalizadas, con errores menores al 2% al omitir  $\alpha$  (E. H. R. Montoya et al., 1999).



En 2002, Eduardo Montoya y Patricia Bedregal aplicaron el AAN para determinar cadmio en diversas muestras. Este estudio desarrolló un método para analizar cadmio en alimentos y materiales biológicos mediante activación neutrónica con separación radioquímica. Las muestras irradiadas se digirieron en presencia de un portador de cadmio, utilizando una mezcla de ácido nítrico y perclórico, y posteriormente se procesaron mediante intercambio iónico con resina Dowex 1-X8. La actividad del  $^{115}\text{mCd}$  se midió con un detector de  $\text{NaI(Tl)}$ . El método fue validado analizando materiales de referencia certificados con concentraciones de cadmio entre 0.020 y 200 mg/kg, mostrando una concordancia del 95% con los valores certificados (P. S. Bedregal & Montoya, 2002).

Eduardo Montoya y Marco Ubillús del GAAN, desarrollaron un procedimiento para determinar oro y plata en concentrados de cobre mediante  $k_0$ -INAA, considerando efectos como la autoatenuación de rayos gamma, el autoapantallamiento de neutrones y las interferencias espectrales. Los resultados mostraron precisión y exactitud satisfactorias, con buena concordancia en los límites de detección esperados (Torres et al., 2003).

El AAN ha sido clave en Perú, particularmente en arqueometría. El IPEN y la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM) colaboraron en la caracterización de aleaciones de cobre de la tumba del Señor de Sicán, cerámicas de la Cultura Wari, piezas de Villa El Salvador y fuentes de obsidiana, contribuyendo al estudio de la producción y distribución de artefactos arqueológicos (Delgado et al., 2007).

Además del AAN en el reactor RP-10, José Solís, del IPEN, comenzó a investigar la técnica del AAN en la radiación gamma inmediata en colaboración con Jean Louis Pinault del OIEA. El método se aplicó en cuatro casos prácticos, incluyendo registros de pozos y análisis en línea en cintas transportadoras de materiales en bruto (Pinault & Solis, 2009).

El método  $k_0$  fue implementado por el GAAN en 1993, y desde mediados de 1994 casi todo el trabajo de AAN instrumental en el IPEN se realiza utilizando este método. Durante su implementación, se prestó especial atención a aspectos complejos como la eficiencia de conteo, la caracterización de la instalación de irradiación, el comportamiento no ideal del espectro de neutrones epitermales y la consistencia de los datos nucleares de entrada (E. Montoya et al., 2010).

En 2010 se evaluó la precisión del método  $k_0$ -INAA utilizando láminas de zinc como comparadores. Se verificó la exactitud para la mayoría de los

elementos analizados. Entre los parámetros experimentales evaluados se incluyeron la eficiencia de conteo de los picos gamma, las coincidencias verdaderas  $\gamma$ - $\gamma$ , la preparación del comparador y las prácticas de aseguramiento y control de calidad (P. Bedregal et al., 2010).

El GAAN desarrolló un método que combina AAN no destructivo con espectrometría alfa de alta resolución para determinar las actividades de  $^{234}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$  en muestras geológicas con bajo contenido de uranio. La concentración de  $^{238}\text{U}$  se determinó mediante activación neutrónica basada en el método  $k_0$ , mientras que la relación  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  se midió mediante espectrometría alfa, tras la extracción y electrodeposición del uranio obtenido por lixiviación con HCl 6 M. Este método fue aplicado a muestras de suelo de la costa norte de Perú. Las concentraciones de uranio en estas muestras oscilaron entre 3 y 40 mg/kg, y la composición isotópica correspondió a uranio natural, con una incertidumbre aproximada del 10% (E. H. Montoya et al., 2012).

En 2014, se analizaron veintidós elementos químicos de importancia arqueológica en figurillas de barro de la civilización Caral (5000 a.C.) utilizando el método  $k_0$ . Las muestras fueron irradiadas en una instalación de canal radial del reactor RP-10, bien caracterizada para este tipo de estudios. Los resultados mostraron un sesgo menor al 10 % para la mayoría de los elementos analizados (P. S. Bedregal et al., 2014).

En 2015, bajo la dirección de Theodora Vasilopoulou, del Instituto Demokritos (Grecia), y con la participación del grupo GAAN del IPEN, se aplicó el método de AAN para muestras grandes (LSNAA, por sus siglas en inglés). Este método, desarrollado en el NCSR Demokritos, se utilizó para analizar un artefacto de cerámica peruana con forma de animal. Los factores de corrección necesarios para la autoprotección de neutrones y la autoatenuación de rayos gamma en el material de la muestra se obtuvieron mediante simulaciones Monte Carlo, empleando el código MCNP. Estas simulaciones se basaron en un modelo preciso obtenido mediante tomografía computarizada de rayos X. Los resultados del LSNAA se compararon con los obtenidos mediante AAN instrumental convencional (INAA), mostrando una muy buena concordancia (Vasilopoulou et al., 2015).

Con la participación de Willy Yépez, del Proyecto Colección Arqueológica La Real de Arequipa, y Justin Jennings, del Royal Ontario Museum de Canadá, el GAAN analizó fragmentos de cerámica arqueológica. Estos fragmentos fueron evaluados mediante  $k_0$ , y los datos analíticos se procesaron con técnicas estadísticas multivariadas. La composición química de las mues-

tras fue comparada con la base de datos existente sobre cerámica arqueológica de Conchopata (Ayacucho), Cotahuasi (Arequipa), Huaró (Cusco) y Tiwanaku (Bolivia). Los resultados revelaron que la mayoría de las piezas probablemente fueron elaboradas localmente en La Real, aunque algunas correspondían a cerámica foránea y un pequeño grupo no pudo clasificarse (P. S. Bedregal et al., 2015).

El análisis de cobre en matrices de zinc mediante activación en reactor presenta desafíos significativos debido a las interferencias generadas por las reacciones  $^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$  y  $^{65}\text{Cu}(n,\gamma)^{66}\text{Cu}$ , que producen actividades dominantes sobre las reacciones de captura  $^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$  y  $^{66}\text{Zn}(n,p)^{66}\text{Cu}$ . Considerando este problema, el GAAN, liderado por Isaac Cohen, exploró la posibilidad de desarrollar un método basado en la medición de las razones de actividad  $^{65}\text{Cu}/^{64}\text{Cu}$ . Este método propone fundamentos teóricos aplicables al control de compuestos de zinc destinados a la producción de  $^{64}\text{Cu}$  (Cohen et al., 2016).

En 2018, preocupados por la seguridad alimentaria y considerando las ventajas del método *k0*-INAA, Patricia Bedregal, Marco Ubillús y Pablo Mendoza del GAAN analizaron varios elementos en hojas y en el producto esteviósido de Stevia rebaudiana Bertoni, cuyo uso como edulcorante ha crecido significativamente en la última década. Utilizando hojas de stevia de diferentes orígenes, determinaron 37 elementos mediante *k0*-INAA. El cobre fue cuantificado utilizando espectrometría de absorción atómica (FAAS), mientras que se analizaron 16 elementos en el esteviósido de diferentes fabricantes. Los resultados subrayaron la necesidad de establecer estrictos controles de calidad sobre el contenido de elementos en las hojas, utilizadas tanto como materia prima para el esteviósido como para su uso directo como edulcorante (P. S. Bedregal, Ubillús, et al., 2018).

Ese mismo año, Patricia Bedregal, Marco Ubillús, Víctor Poma e Isaac Cohen evaluaron la metodología para la preparación de monitores y comparadores destinados al método *k0*-INAA. El procedimiento consiste en depositar una cantidad conocida de una solución estándar primaria o secundaria del elemento de interés sobre un disco de papel filtro. Este se seca y se convierte en pequeñas tabletas para garantizar una geometría uniforme con las muestras desconocidas. El sodio y el zinc se utilizan regularmente como comparadores, mientras que el molibdeno, el oro, el cobalto y el lutecio se seleccionan para determinar los flujos del reactor y la temperatura neutrónica. Para medir las masas depositadas en los discos de papel filtro, se emplearon dos métodos diferentes basados en la determinación de peso o volumen (P. S. Bedregal, Ubillús, et al., 2018).

También en 2018, un equipo liderado por Juan Bazo de la PUCP, irradiaron muestras de dos materiales semiconductores característicos, silicio y germanio, con neutrones producidos en el reactor RP-10 a 4.5 MW. Los espectros de fotones de los radionúclidos resultantes se midieron mediante espectroscopía gamma de alta resolución, cuantificando cuatro radioisótopos:  $^{28}\text{Al}$ ,  $^{29}\text{Al}$  para el silicio y  $^{75}\text{Ge}$  y  $^{77}\text{Ge}$  para el germanio. Los datos obtenidos se compararon con simulaciones Monte Carlo realizadas con el software FLUKA. Estas evaluaron la capacidad de la biblioteca de neutrones de baja energía de FLUKA (ENDF/B-VIIR) para calcular fotones de decaimiento en relación con la activación de los semiconductores. Los resultados demostraron que FLUKA puede predecir con precisión las amplitudes relativas de los picos de fotones con intensidades gamma superiores al 1%, con una incertidumbre promedio del 13%. También se estimaron errores sistemáticos en los estudios de simulación de activación neutrónica para estos materiales sensores (Bazo et al., 2018).

En 2023, un equipo interinstitucional, liderado por Patricia Bedregal evaluó los componentes del aerosol atmosférico en el área urbana de Carabaylo (P. Bedregal et al., 2023).

Para determinar la presencia de elementos pesados en aguas del océano Pacífico frente a Lima, producida por un derrame de petróleo, se analizaron dos muestras de sedimentos: una proveniente de un sitio afectado por un derrame de petróleo y otra recolectada a 125 km aguas arriba del derrame, utilizada como muestra de control. Mientras que el arsénico, el cobre y el plomo presentaron concentraciones por encima de los umbrales recomendados, todas las concentraciones de metales pesados en el sitio contaminado (excepto el arsénico) superaron significativamente las de la muestra de control (P. Bedregal et al., 2024).

## 2.8 Producción de radioisótopos

El molibdeno-99 ( $^{99}\text{Mo}$ ) es uno de los radionúclidos más importantes para diagnósticos médicos. En 2015, el OIEA organizó un ejercicio de intercomparación (round-robin) en el que los participantes midieron y calcularon las actividades específicas de saturación alcanzables para la reacción  $^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$ . Esta reacción es de interés como un medio para producir  $^{99}\text{Mo}$  a partir de molibdeno natural, permitiendo su producción local y a pequeña escala. Un equipo internacional conformado por 15 instituciones, en el que el IPEN estuvo representado por Patricia Bedregal, analizó los resultados experimentales y revisó la metodología para calcular las actividades

de saturación correspondientes. Se destacó la importancia de la activación por neutrones epitermales, así como el efecto del auto apantallamiento de neutrones epitermales en el proceso (Blaauw et al., 2017).

En 2018, bajo el liderazgo de Isaac Cohen, el GAAN identificó  $^{95m}\text{Tc}$ , como un subproducto en algunas soluciones de  $^{99m}\text{Tc}$ , obtenidas mediante la irradiación de trióxido de molibdeno en un flujo de neutrones de reactor. La caracterización se realizó mediante mediciones por espectrometría gamma y determinación de la vida media. Además, se analizaron las posibles vías que conducen a la producción de  $^{95m}\text{Tc}$  en un reactor nuclear (Cohen et al., 2018).

En 2020, Martha Alviar (UNFV), Jesús Miranda y Patricia Bedregal (IPEN) evaluaron la volatilidad y perfil de oxidación de varias sustancias. Posteriormente, realizaron experimentos para evaluar una nueva mezcla de excipientes con el objetivo de mejorar su rendimiento (Alviar et al., 2020).

## **2.9 Física de reactores en el RP-10**

En 2003, Agustín Zúñiga y Ricardo Cuya, del IPEN, con el apoyo del físico nuclear Matjaž Ravnik, del Jožef Stefan Institute en Eslovenia, midieron el quemado de elementos combustibles en reactores de investigación tipo MTR (Material Testing Reactor) utilizando el método de reactividad. El quemado del combustible, un parámetro crucial que indica la cantidad de energía extraída del material nuclear, es esencial para la gestión eficiente y segura del reactor. Este método evalúa los cambios en la reactividad del núcleo para estimar el quemado del combustible, y el trabajo fue realizado en el reactor RP-10 (Zuniga et al., 2003).

Para garantizar su funcionamiento óptimo, en 2005, Alberto Gallardo y Gerardo Lázaro del IPEN estudiaron la forma de minimizar el costo total asociado al tiempo entre pruebas en el RP-10. Este costo incluye tanto los gastos derivados de las pruebas del sistema de corte como los asociados a fallos potenciales. A través de un análisis detallado, se determinó el intervalo óptimo entre pruebas, logrando un equilibrio entre seguridad operativa y eficiencia económica en el mantenimiento del reactor (Aguirre & Lazaro, 2005).

En 2011, el grupo de Física de Reactores del IPEN, conformado por Mariano Vela, Alberto Gallardo y José Palomino, con la colaboración de Luis Antonio Terremoto, del Centro de Engenharia Nuclear (CEN) de São Paulo, llevó a cabo mediciones en la piscina de almacenamiento del reactor RP-

10. Utilizaron  $^{137}\text{Cs}$  como único monitor de quemado, incluso para elementos combustibles gastados con tiempos de enfriamiento inferiores a dos años. El aparato experimental empleado fue previamente calibrado en eficiencia para obtener valores absolutos del quemado promedio, que posteriormente se compararon con los valores calculados mediante modelos de física de reactores. Los resultados mostraron una desviación media del 6% entre ambos valores. La espectroscopía gamma, un método no destructivo, fue clave para la calificación de combustibles nucleares irradiados. El parámetro principal requerido para esta calificación es el quemado promedio de los elementos combustibles gastados (Mora et al., 2011).

## 2.10 Perspectivas nucleares del IPEN

Al analizar las publicaciones del IPEN en revistas indexadas en la base de datos Scopus, se destacan los siguientes puntos:

**Geología del uranio:** El IPEN realizó importantes investigaciones en geología del uranio, contribuyendo significativamente al conocimiento en este campo. Sin embargo, estas actividades fueron clausuradas en 1997, poniendo fin a esta línea de investigación.

**Fisión nuclear:** Los estudios sobre fisión nuclear realizados por el IPEN hasta el 2014. Después de ese año, estas investigaciones son continuadas en la UNI, continuando con el desarrollo de este campo.

**Neutrónica:** La última publicación del IPEN relacionada con neutrónica data de 2003.

**Quemado de combustible:** En 2011, un equipo liderado por Mario Vela y asesorado por Luis Terremoto, del Centro de Engenharia Nuclear (CEN) de São Paulo, publicó el único artículo sobre el quemado de combustible en reactores de investigación.

El GAAN es el único grupo del IPEN que, en relación con el uso del reactor RP-10, mantiene una producción en revistas indexadas. Formado al inicio de las actividades del instituto, el GAAN ha sido fundamental para la continuidad de las publicaciones científicas.

Aunque el RP-10 fue construido para ser una herramienta clave en la investigación con técnicas neutrónicas, no se aseguraron los recursos necesarios para adquirir los instrumentos que permitieran aprovechar plenamente los haces de neutrones. Actualmente, no se utilizan las seis salidas de los tubos con radiación neutrónica a la sala experimental. Tampoco es usada la columna térmica.

Desde su fundación en 1975 hasta el año 2024, el IPEN ha publicado un promedio de dos artículos anuales en revistas indexadas. Si bien hubo un incremento en la producción científica entre 2001 y 2007, este fue seguido por un marcado declive. La evaluación de estas cifras refleja la necesidad de una mayor inversión y planificación estratégica para revitalizar las capacidades del instituto.

### **3. CONCLUSIONES**

La instalación de investigación de mayor dimensión que tiene el Perú es el RP-10 del IPEN. Es el reactor de investigaciones de mayor potencia de América Latina.

El reactor RP-10 dispone de seis salidas de radiación neutrónica colimada que conducen a la sala experimental, donde la fisión del  $^{235}\text{U}$  emite neutrones. Sin embargo, estas salidas actualmente se encuentran sin uso. Más cerca del núcleo, existen posiciones de irradiación no colimada, utilizadas principalmente para el AAN y la producción de radioisótopos, que posteriormente son transformados en radiofármacos.

Con base en las publicaciones científicas indexadas en Scopus, se concluye que la principal línea de investigación asociada al reactor RP-10 está vinculada al análisis por activación neutrónica. No obstante, el volumen de publicaciones refleja una actividad científica limitada.

La función predominante del reactor RP-10 ha sido la producción de radiofármacos para el abastecimiento de centros médicos, una actividad que no constituye investigación propiamente dicha. Por otro lado, han surgido empresas privadas que importan esos radiofármacos para distribuirlos en el Perú.

El componente más importante en toda institución, y en especial en una dedicada a la investigación es el potencial humano. Según RENACYT, el IPEN cuenta con solo cinco investigadores reconocidos como activos: el de mayor producción está en nivel IV, siendo VII el nivel el más bajo en la clasificación. Con cinco investigadores no se puede dar un impulso significativo a la investigación básica o aplicada en una institución científica y tecnológica.

A la luz de esta situación, promover el desarrollo nuclear en el Perú requeriría la incorporación de un número mayor de investigadores reconocidos por el CONCYTEC y una inversión alineada con las necesidades tecnológicas contemporáneas.

## REFERENCIAS

- Aguirre, A. H., & Lazaro, G. S. (2005). Maintenance optimization of the RP10 shutdown safety system. *Advances in Safety and Reliability - Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2005*.
- Alviar, M., Miranda, J., & Bedregal, P. (2020). A proposal of excipients mixture for the elaboration of Na131I capsules. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 325*(3), 857–862. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07255-w>
- Amaya, F., & Montoya, M. (2000). Simulation of X ray irradiation on human hand. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology - Proceedings, 4*.
- Bazo, J., Rojas, J. M., Best, S., Bruna, R., Endress, E., Mendoza, P., Poma, V., & Gago, A. M. (2018). Testing FLUKA on neutron activation of Si and Ge at nuclear research reactor using gamma spectroscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 885*, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.12.042>
- Bedregal, P., Mendoza, P., Ubillús, M., & Montoya, E. (2010). K0-INAA method accuracy using Zn as comparator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 622*(2), 419–424. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.01.043>
- Bedregal, P., Najarro, L., Jara, R., & Ubillus, M. (2024). Heavy metals contamination from the oil spill incident in the Peruvian Sea, determined by k0-INAA and AAS. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 333*(12), 6653–6659. <https://doi.org/10.1007/s10967-024-09836-5>
- Bedregal, P. S., Mendoza, P. A., Ubillús, M. S., Cohen, I. M., & Montoya, E. H. (2014). The k 0 and relative INAA methods to determine elements in entire archaeological pottery objects. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 300*(2), 673–678. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3080-7>
- Bedregal, P. S., Mendoza, P. A., Ubillús, M. S., Yépez, W., Jennings, J., & Montoya, E. H. (2015). Wari influence in southern Peru: provenance study of middle horizon pottery from the archaeological site of La Real using k 0-INAA. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 306*(3), 729–736. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4128-z>
- Bedregal, P. S., & Montoya, E. H. (2002). Determination of cadmium using radiochemical neutron activation analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 254*(2), 363–364. <https://doi.org/10.1023/A:1021644420926>
- Bedregal, P. S., Ubillús, M. S., & Mendoza, P. A. (2018). k0-INAA as a contributor in nutrition and health: multielemental determination in Stevia rebaudiana Bertoni, leaves and stevioside product. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 315*(2), 309–314. <https://doi.org/10.1007/s10967-017-5684-1>



- Bedregal, P. S., Ubillus, M. S., Poma, V. R., & Cohen, I. M. (2018). The preparation of monitors and comparators for k0-INAA using standard solutions. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 315(3), 695–701. <https://doi.org/10.1007/s10967-017-5695-y>
- Bedregal, P., Ubillus, M., Cáceres-Rivero, C., Olivera, P., Garay, R., Rojas, J., Zafra, R., & Urdanivia, R. (2023). Determination of atmospheric aerosol components in an urban area to evaluate the air quality and identify the sources of contamination. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 332(8), 3507–3514. <https://doi.org/10.1007/s10967-023-08805-8>
- Blaauw, M., Ridikas, D., Baytelesov, S., Salas, P. S. B., Chakrova, Y., Eun-Ha, C., Dahalan, R., Fortunato, A. H., Jacimovic, R., Kling, A., Muñoz, L., Mohamed, N. M. A., Párkányi, D., Singh, T., & Van Dong Duong. (2017). Estimation of 99Mo production rates from natural molybdenum in research reactors. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 311(1), 409–418. <https://doi.org/10.1007/s10967-016-5036-6>
- Cheilletz, A., Clark, A. H., Farrar, E., Pauca, G. A., Pichavant, M., & Sandeman, H. A. (1992). Volcano-stratigraphy and 40Ar/39Ar geochronology of the Macusani ignimbrite field: monitor of the Miocene geodynamic evolution of the Andes of southeast Peru. *Tectonophysics*, 205(1–3), 307–327. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90433-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90433-7)
- Cohen, I. M., Robles, A., Mendoza, P., Airas, R. M., & Montoya, E. H. (2018). Experimental evidences of 95mTc production in a nuclear reactor. *Applied Radiation and Isotopes*, 135, 207–211. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.02.001>
- Cohen, I. M., Segovia, M. S., Bedregal, P. S., Mendoza, P. A., Aguirre, A. R., & Montoya, E. H. (2016). A novel method for determination of copper in zinc destined to 64Cu production in a nuclear reactor. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 309(1), 23–26. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4678-0>
- Delgado, M., Olivera, P., Montoya, E. & Bustamante, A. (2007). Bulginda a bridge to the past: archaeometry at the IPEN reactor. *Archaeometry*, 49(2), 403–412. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2007.00310.x>
- Gobierno del Perú. (2022, April 21). Ley de creación del Instituto Peruano de Energía Nuclear. *Plataforma Del Estado Peruano*. [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3283891/ley\\_creacion.pdf.pdf?v=1655839989](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3283891/ley_creacion.pdf.pdf?v=1655839989)
- Gobierno Peruano. (1977, July 5). Ley Orgánica del Instituto Peruano de Energía Nuclear, Ley 21875. *Diario Oficial El Peruano*. <https://docs.peru.justia.com/federales/decretos-leyes/21875-jul-5-1977.pdf>
- Hinostroza, H., Ravello, Y., Cornejo, N., Mendoza, M., Montoya, M., Zúñiga, A., Huapaya, I., Hinostroza, H., & Hinostroza, H. (1992). Neutrografía en el reactor peruano RP-10. *INSTITUTO PERUANO DE ENERGÍA NUCLEAR-IPEN*. <http://dspace.ipen.gob.pe/handle/ipen/154>

- Hurtado de Mendoza, D. (2009). Periferia y fronteras tecnológicas. Energía nuclear y dictadura militar en la Argentina (1976-1983). *Revista Iberoamericana de Ciencia Tecnología y Sociedad*, 5(13), 27–64. [https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-00132009000200003&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-00132009000200003&script=sci_arttext)
- Instituto Peruano de Energía Nuclear. (2006). *Informe de Gestión 2001-2005*. <https://www.ipen.gob.pe/images/MEMORIA-GESTION-2006-2021-01.pdf>
- IPEN. (2024). *Instituto Peruano de Energía Nuclear. Informe de Gestión 2023*. <https://www.gob.pe/institucion/ipen/informes-publicaciones/5644396-informe-de-gestion-2023>
- J. Valencia, & G. Arroyo. (1985). Geochemical aspects of the uranium occurrences of Macusani, Puno, Peru. *Technical Committee Meeting on Uranium Deposits in Volcanic Rocks.*, 275–288.
- Montoya, E., Bedregal, P., Mendoza, P., Ubillús, M., Torres, B., & Cohen, I. M. (2010). The development of the k0 method in Peru: Past, present and future perspectives. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 622(2), 381–384. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.04.005>
- Montoya, E. H., Mendoza, P. A., Bedregal, P. S., Baltuano, O. R., & Cohen, I. M. (2012). A combined method of neutron activation analysis and radiometric measurements for <sup>234</sup>U and <sup>238</sup>U determination in soil samples of low uranium concentration. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 291(1), 175–178. <https://doi.org/10.1007/s10967-011-1273-x>
- Montoya, E. H. R., Cohen, I. M., Hidalgo, P. M., Chamorro, B. T., & Salas, P. B. (1999). The corrections for non-ideal behavior of the epithermal neutron spectrum and the restitution of the simplicity in parametric activation analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 240(2), 475–479. <https://doi.org/10.1007/BF02349399>
- Montoya, M. (1984). Mass and kinetic energy distribution in cold fission of <sup>233</sup>U, <sup>235</sup>U and <sup>239</sup>Pu induced by thermal neutrons. *Zeitschrift Für Physik A Atoms and Nuclei*, 319(2), 219–225. <https://doi.org/10.1007/BF01415636>
- Montoya, M. (2014). Coulomb effects in isobaric cold fission from reactions <sup>233</sup>U(nth,f), <sup>235</sup>U(nth,f), <sup>239</sup>Pu(nth,f) and <sup>252</sup>Cf(sf). *Revista Mexicana de Física*, 60(5), 350–356.
- Montoya, M., Rojas, J., & Lobato, I. (2008). Neutron emission effects on final fragments mass and kinetic energy distribution from low energy fission of <sup>234</sup>U. *Revista Mexicana de Física*, 54(6), 440–445. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0035-001X2008000600006&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0035-001X2008000600006&script=sci_arttext)

- Montoya, M., Saettone, E., & Rojas, J. (2007). Monte Carlo simulation for fragment mass and kinetic energy distributions from the neutron-induced fission of  $^{235}\text{U}$ . *Revista Mexicana de Física*, 53(5), 366–370. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0035-001X2007000500006&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0035-001X2007000500006&lng=es&nrm=iso)
- Mora, M. V., Padilla, A. G., Palomino, J. L. C., & Terremoto, L. A. A. (2011). Nondestructive burnup measurements by gamma-ray spectroscopy on spent fuel elements of the RP-10 research reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 53(4), 344–353. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2011.01.003>
- Munive, M., Baltuano, Ó., Gago, J., & Bautista, G. (2007). *Avances en el montaje del difractor Amauta*. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21294579>
- Munive, M., Baltuano, Ó., Gago, J., Hernández, Y., & Arrieta, R. (2010). *First records of powder diffraction patterns of nickel and yttrium oxide in the “Amauta” neutron diffractometer; Primeros registros de patrones de difracción de polvo de níquel y óxido de itrio en el difractor de neutrones “Amauta.”* <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21402838>
- Pichavant, M., Kontak, D. J., Briquieu, L., Herrera, J. V., & Clark, A. H. (1988a). The Miocene-Pliocene Macusani Volcanics, SE Peru. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 100(3), 325–338. <https://doi.org/10.1007/BF00379742>
- Pichavant, M., Kontak, D. J., Briquieu, L., Herrera, J. V., & Clark, A. H. (1988b). The Miocene-Pliocene Macusani Volcanics, SE Peru. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 100(3), 325–338. <https://doi.org/10.1007/BF00379742>
- Pinault, J.-L., & Solis, J. (2009). The optimization of gamma spectra processing in prompt gamma neutron activation analysis (PGNAA). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 267(7), 1139–1148. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.01.131>
- Poupeau, G., Labrin, E., Sabil, N., Bigazzi, G., Arroyo, G., & Vatin-Pérignon, N. (1993). Fission-track dating of 15 macusanite glass pebbles from the Macusani volcanic field (SE Peru). *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 21(4), 499–506. [https://doi.org/10.1016/1359-0189\(93\)90189-G](https://doi.org/10.1016/1359-0189(93)90189-G)
- Poupeau, G., Sabil, N., Villa, I. M., Bigazzi, G., Vatin-Pérignon, N., Flores, P., Pereyra, P., Salas, G., & Arroyo, G. (1992). Fission-track and K-Ar ages of “macusanite” obsidian glasses, (SE Peru): Geodynamic implications. *Tectonophysics*, 205(1–3), 295–305. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90432-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90432-6)
- Radicella, R. (2008). El Proyecto Perú. *Revista de La Comisión Nacional de Energía Atómica*, 8(29/30), 5–13. <https://las-ans.org.br/wp-content/uploads/2019/04/33-Radicella.pdf>
- Ravello, Y. (2001). *Characterization and adjustment of the neutron radiography facility of the RP-10 nuclear reactor; Caracterización y puesta a punto de la facilidad de neutrografía del reactor nuclear RP-10*. Universidad Nacional de Ingeniería.

- Sandeman, H. A., Clark, A. H., Farrar, E., & Arroyo-Pauca, G. (1996). A critical appraisal of the Cayconi Formation, Crucero Basin, southeastern Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 9(5–6), 381–392. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(96\)00021-1](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(96)00021-1)
- Sandeman, H. A., Clark, A. H., Farrar, E., & Pauca, G. A. (1997). Lithostratigraphy, petrology and  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  geochronology of the Crucero Supergroup, Puno department, SE Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 10(3–4), 223–245. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(97\)00023-0](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(97)00023-0)
- Torres, B., Montoya, E., Mendoza, P., Bedregal, P., Ubillús, M., & Olivera, P. (2003). Determination of gold and silver in copper concentrates, using  $k_0$  based neutron activation analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 257(3), 597–601. <https://doi.org/10.1023/A:1025452901690>
- Vasilopoulou, T., Stamatelatos, I. E., Montoya, E. H., Bedregal, P. S., Tsalafoutas, I., & Bode, P. (2015). Large sample neutron activation analysis of irregular-shaped pottery artifacts. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 303(1), 853–858. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3307-7>
- Zuniga, A., Cuya, R. T., & Ravnik, M. (2003). MTR fuel element burn-up measurements by the reactivity method. *Kerntechnik*, 68(1–2), 23–27. <https://doi.org/10.1515/kern-2003-681-208>